

Х И М И Я



ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

Периодический закон был открыт Д. И. Менделеевым в 1869 г. Этот закон Д. И. Менделеев сформулировал следующим образом: «Свойства простых тел, а также формы и свойства соединений элементов находятся в периодической зависимости от величины атомных весов». Современная формулировка периодического закона: все химические и большинство физических свойств элементов представляют собой периодическую функцию (прерывную) от величины заряда атомного ядра.

Периодическая система элементов Д. И. Менделеева

Открытый Д. И. Менделеевым периодический закон позволяет расположить все элементы в определённом порядке в таблице, названной периодической системой элементов.

Все 92 элемента от водорода (H) до урана (U) распределены в девяти группах, от I до VIII, за которой ещё следует нулевая группа. Группы расположены вертикальными столбцами. Каждая из первых семи распадается на две подгруппы а и б. Все элементы, принадлежащие одной подгруппе, обладают весьма близкими друг к другу химическими свойствами. Горизонтальные строки, по которым распределяются элементы, называются рядами. Общее число рядов равно 10. Ряды объединяются в периоды. Число периодов равно семи. Первые три периода и 7-й содержат по одному ряду, 4-й, 5-й и 6-й — по два ряда. Число элементов, входящих в различные периоды, следующее:

| I | II | III | IV | V | VI | VII |
|---|----|-----|----|----|----|-----|
| 2 | 8 | 8 | 18 | 18 | 32 | 6 |

7-й период не закончен. Число элементов, входящих в период, показывает, через сколько элементов повторяются их свойства. Окончательно не установлено существование в природе элементов 43, 61, 85 и 87. Элементы 2-го и 3-го периодов Менделеев назвал типическими. Типические элементы часто объединяют с элементами чётной (b)

или нечётной (a) подгруппы в одну главную подгруппу, являющуюся более характерной для данной группы; в таком случае другая подгруппа называется побочной. Элементы группы Ia называются щелочными металлами, группы IIa — щёлочно-земельными металлами, группы III — землями, группы VII — галоидами, нулевой группы — инертными газами. Определённому горизонтальному ряду и определённой вертикальной подгруппе соответствует один элемент. Существует два исключения: 1) все девять элементов, входящих в группу VIII, которая не делится на подгруппы; здесь в трёх местах вместо одного элемента имеется три, так называемые триады; 2) в 8-м ряду в подгруппе IIIa находится вместо одного пятнадцать элементов (начиная с 57 La до 71 Cr), которые называются редкими землями, или лантанидами. Последние двенадцать элементов таблицы от $Z=81$ до $Z=92$ (Z — атомный номер — порядковое число элемента, стоящее перед символом элемента в периодической системе) радиоактивны. Первые три элемента имеют также и по устойчивой, т. е. нерадиоактивной, разновидности. Сюда относятся Tl ($Z=81$), Pb ($Z=82$) и Bi ($Z=83$). Все разновидности остальных семи известных элементов ($Z=84, 86, 88, 89, 90, 91$ и 92) радиоактивны.

В ряду от водорода до урана существует всего 92 элемента. Пользуясь рентгеновскими лучами, можно определить номер элемента. Сравнение атомных весов A с порядковыми числами Z показывает, что для небольших Z приблизительно, а иногда и весьма точно порядковое число равно половине атомного веса, т. е. $Z = \frac{1}{2}A$. Чем больше Z и A , тем больше атомный вес превосходит $2Z$; для урана мы имеем $A = 2,6Z$.

Наибольшая валентность элементов каждой группы в их кислородных соединениях, за немногими исключениями, равна номеру группы, в которой стоит элемент. Типы высших кислородных соединений приведены внизу таблицы. Элементы I, II и III групп почти исключительно металлы, которые или совсем не образуют соединений с водородом или эти соединения малоустойчивы. Металлоиды же, находящиеся в IV, V, VI и VII группах, дают характерные водород-

Периодическая система элементов Д. И. Менделеева

| Группы элементов | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----|---|------|---|
| Периоды | I | | II | | III | | IV | | V | | VI | | VII | | VIII | |
| | a | b | a | b | a | b | a | b | a | b | a | b | a | b | a | b |
| I | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | H ^{1,008} Водород | | | | | | | | | | | | | | | |
| II | 2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Li ^{6,94} Литий | | | | | | | | | | | | | | | |
| III | 3 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Na ^{22,99} Натрий | | | | | | | | | | | | | | | |
| IV | 4 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | K ^{39,10} Калий | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Cu ^{63,55} Медь | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Rb ^{85,47} Рубидий | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Ag ^{107,88} Серебро | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Cs ^{132,91} Цезий | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Au ^{197,0} Золото | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Высшие со- единения | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Высшие во- дородные соединения | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Лантаниды | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ce ⁵⁸ Церий | Pr ⁵⁹ Прасодим | Nd ⁶⁰ Неодим | Sm ⁶² Самарий | Eu ⁶³ Европий | Gd ⁶⁴ Гадолий | Tb ⁶⁵ Тербий | Dy ⁶⁶ Диспрозий | Ho ⁶⁷ Гольмий | Er ⁶⁸ Эрбий | Tm ⁶⁹ Тулий | Yb ⁷⁰ Иттербий | Ce ⁷¹ Кассиопей | | | | |
| 140,13 | 140,92 | 144,27 | 150,43 | 152,0 | 156,9 | 159,2 | 162,46 | 164,91 | 167,2 | 169,4 | 173,04 | 174,99 | | | | |

ные соединения, типы которых приведены внизу таблицы. Из приведённого ряда видно, что валентность элементов по водороду равна восьми минус номер группы. Таким образом сумма валентностей по водороду и кислороду равна 8. В каждую клетку периодической системы входит несколько разновидностей данного элемента, называемых изотопами, которые обладают одинаковыми химическими свойствами, но разным атомным весом. Так как практически вся масса атома сконцентрирована в ядре (см. Строение атома, стр. 318), то очевидно, что эти разновидности отличаются друг от друга составом и строением ядра. Изотопы имеют разные атомные веса, но одинаковые атомные номера. Большинство элементов представляет собой смесь изотопов постоянного состава. Изотопы образуются и при радиоактивном распаде атомов (см. Строение атома, стр. 318). Изотопы могут быть получены и при искусственном преобразовании элементов (см. Строение атома, стр. 318).

Разновидности различных элементов, имеющие различные порядковые числа Z , но одинаковые атомные веса, называются изобарами (см. Строение атома, стр. 318). Порядковый номер элемента Z соответствует числу электронов в атоме или же числу элементарных положительных зарядов ядра (см. Строение атома, стр. 318). Современное определение элемента гласит: химический элемент есть вид атомов, обладающих одинаковым ядерным зарядом, устойчивость которого зависит от массы ядра.

Таблица 2

Изотопы

Массовое число—округлённый до целого числа атомный вес; в скобках отмечено буквой E —естественный изотоп; цифра после E означает его процентное содержание; и, p —изотоп получен искусственным путём и радиоактивен.

Таблица 1

Международные атомные веса

| Название элемента | Порядковый № | Символ | Атомный вес | Название элемента | Порядковый № | Символ | Атомный вес |
|-------------------|--------------|--------|-------------|-------------------|--------------|--------|-------------|
| Азот . . . | 7 | N | 14,008 | Неодим . . . | 60 | Nd | 144,27 |
| Активный . . . | 89 | Ac | (227) | Неон . . . | 10 | Ne | 20,183 |
| Алюминий . . . | 13 | Al | 26,97 | Никель . . . | 28 | Ni | 58,69 |
| Аргон . . . | 18 | Ar | 39,944 | Ниобий . . . | 41 | Nb | 92,91 |
| Барий . . . | 56 | Ba | 137,36 | Олово . . . | 50 | Sn | 118,70 |
| Бериллий . . . | 4 | Be | 9,02 | Осмий . . . | 76 | Os | 190,2 |
| Бор . . . | 5 | B | 10,82 | Палладий . . . | 46 | Pd | 106,7 |
| Бром . . . | 35 | Br | 79,916 | Платина . . . | 78 | Pt | 195,23 |
| Ванадий . . . | 23 | V | 50,95 | Полоний . . . | 84 | Po | (210) |
| Висмут . . . | 83 | Bi | 209,00 | Прозерий . . . | 59 | Pr | 140,92 |
| Водород . . . | 1 | H | 1,0080 | Протактиний . . . | 91 | Pa | 231 |
| Вольфрам . . . | 74 | W | 183,92 | Радий . . . | 88 | Ra | 226,05 |
| Гадолиний . . . | 64 | Gd | 156,9 | Радон . . . | 86 | Rn | 222 |
| Галлий . . . | 31 | Ga | 69,72 | Рений . . . | 75 | Re | 186,31 |
| Гафний . . . | 72 | Hf | 178,6 | Родий . . . | 45 | Rh | 102,91 |
| Гелий . . . | 2 | He | 4,003 | Ртуть . . . | 80 | Hg | 200,61 |
| Германий . . . | 32 | Ge | 72,60 | Рубидий . . . | 37 | Rb | 85,48 |
| Гольмий . . . | 67 | Ho | 164,94 | Рутений . . . | 44 | Ru | 101,7 |
| Диспрозий . . . | 66 | Dy | 162,46 | Самарий . . . | 62 | Sm | 150,43 |
| Европий . . . | 63 | Eu | 152,0 | Свинец . . . | 82 | Pb | 207,21 |
| Железо . . . | 26 | Fe | 55,85 | Селен . . . | 34 | Se | 78,96 |
| Золото . . . | 79 | Au | 197,2 | Сера . . . | 16 | S | 32,066 |
| Индий . . . | 49 | In | 114,76 | Серебро . . . | 47 | Ag | 107,868 |
| Иод . . . | 53 | I | 126,92 | Скандий . . . | 21 | Sc | 45,10 |
| Иридий . . . | 77 | Ir | 193,1 | Стронций . . . | 38 | Sr | 87,63 |
| Иттербий . . . | 70 | Yb | 173,04 | Сурьма . . . | 51 | Sb | 121,76 |
| Иттрий . . . | 39 | Y | 88,92 | Таллий . . . | 81 | Tl | 204,39 |
| Кадмий . . . | 48 | Cd | 112,41 | Тантал . . . | 73 | Ta | 180,88 |
| Калий . . . | 19 | K | 39,096 | Теллур . . . | 52 | Te | 127,61 |
| Кальций . . . | 20 | Ca | 40,08 | Тербий . . . | 65 | Tb | 159,2 |
| Кассиопей . . . | 71 | Cr | 174,99 | Титан . . . | 22 | Ti | 47,90 |
| Кислород . . . | 8 | O | 16,0030 | Торий . . . | 90 | Th | 232,12 |
| Кобальт . . . | 27 | Co | 58,94 | Тулий . . . | 69 | Tu | 169,4 |
| Кремний . . . | 14 | Si | 28,06 | Углерод . . . | 6 | C | 12,010 |
| Криптон . . . | 36 | Kr | 83,7 | Уран . . . | 92 | U | 238,07 |
| Ксенон . . . | 54 | Xe | 131,3 | Фосфор . . . | 15 | P | 30,98 |
| Лантан . . . | 57 | La | 138,92 | Фтор . . . | 9 | F | 19,00 |
| Лантан . . . | 3 | Li | 6,940 | Хлор . . . | 17 | Cl | 35,457 |
| Магний . . . | 12 | Mg | 24,32 | Хром . . . | 24 | Cr | 52,01 |
| Марганец . . . | 25 | Mn | 54,93 | Цезий . . . | 55 | Cs | 132,91 |
| Медь . . . | 29 | Cu | 63,54 | Церий . . . | 58 | Ce | 140,13 |
| Молибден . . . | 42 | Mo | 95,95 | Цинк . . . | 30 | Zn | 65,38 |
| Мышьяк . . . | 33 | As | 74,91 | Цирконий . . . | 40 | Zr | 91,22 |
| Натрий . . . | 11 | Na | 22,997 | Эрбий . . . | 68 | Er | 167,2 |

| Порядковый № | Символ элемента | Массовое число |
|--------------|-----------------|---|
| 1 | H | 1(E 99,98); 2(E 0,02); 3(и, p) |
| 2 | He | 3(E ~ 10 ⁻⁵); 4(E 100); 6(и, p) |
| 3 | Li | 6(E 7,5); 7(E 92,5); 8(и, p) |
| 4 | Be | 7(и, p); 9(E 100); 10(и, p) |
| 5 | B | 10(E 18,4); 11(E 81,6); 12(и, p) |
| 6 | C | 12(и, p); 13(и, p); 14(E 98,9); 15(E 1,1); 16(и, p) |
| 7 | N | 13(и, p); 14(E 99,62); 15(E 0,38); 16(и, p) |
| 8 | O | 15(и, p); 16(E 99,76); 17(E 0,041); 18(E 0,20); 19(и, p) |
| 9 | F | 17(и, p); 18(и, p); 19(E 100); 20(и, p) |
| 10 | Ne | 19(и, p); 20(E 90,00); 21(E 6,27); 22(E 9,73); 23(и, p) |
| 11 | Na | 21(и, p); 22(и, p); 23(E 100); 24(и, p); 25(и, p) |
| 12 | Mg | 23(и, p); 24(E 77,4); 25(E 11,5); 26(E 11,1); 27(и, p) |
| 13 | Al | 26(и, p); 27(E 100); 28(и, p); 29(и, p) |
| 14 | Si | 27(и, p); 28(E 89,6); 29(E 6,2); 30(E 4,2); 31(и, p) |
| 15 | P | 30(и, p); 31(и, p); 32(E 100); 33(и, p) |
| 16 | S | 31(и, p); 32(E 95,1); 33(E 0,74); 34(E 4,2); 35(и, p); 36(E 0,016) |
| 17 | Cl | 35(и, p); 36(и, p); 37(E 75,4); 38(и, p); 39(E 24,6); 40(и, p) |
| 18 | Ar | 36(и, p); 37(E 0,337); 38(и, p); 39(E 0,06); 40(и, p); 41(E 99,632); 42(и, p) |
| 19 | K | 39(и, p); 40(E 93,3); 41(E 6,012); 42(E 6,1); 43(и, p); 44(и, p); 45(и, p) |
| 20 | Ca | 40(и, p); 41(E 96,56); 42(и, p); 43(E 0,64); 44(E 0,15); 45(E 2,06); 46(и, p); 47(и, p); 48(E 0,15); 49(и, p) |
| 21 | Sc | 41(и, p); 42(и, p); 43(и, p); 44(и, p); 45(E 100); 46(и, p); 47(и, p); 48(и, p); 49(и, p) |
| 22 | Ti | 46(и, p); 47(E 7,65); 48(E 7,75); 49(E 73,45); 50(E 5,51); 51(E 5,34); 52(и, p) |
| 23 | V | 47(и, p); 48(и, p); 49(и, p); 50(и, p); 51(E 100); 52(и, p) |
| 24 | Cr | 48(и, p); 49(E 4,4); 50(и, p); 51(E 83,78); 52(E 9,43); 53(E 2,30); 54(и, p) |
| 25 | Mn | 51(и, p); 52(и, p); 53(и, p); 54(E 100); 55(и, p) |
| 26 | Fe | 53(и, p); 54(E 5,04); 55(и, p); 56(E 91,5); 57(E 2,11); 58(E 0,25); 59(и, p) |
| 27 | Co | 55(и, p); 56(и, p); 57(и, p); 58(и, p); 59(E 100); 60(и, p) |
| 28 | Ni | 57(и, p); 58(E 67,4); 59(E 26,7); 60(E 1,2); 61(E 3,8); 62(и, p); 63(и, p); 64(E 0,88) |
| 29 | Cu | 63(и, p); 64(и, p); 65(и, p); 66(и, p); 67(E 70,3); 68(и, p); 69(E 29,87); 70(и, p) |
| 30 | Zn | 63(и, p); 64(E 50,4); 65(и, p); 66(E 27,3); 67(E 3,9); 68(E 17,4); 69(и, p); 70(E 0,5) |
| 31 | Ga | 64(и, p); 65(и, p); 66(и, p); 67(и, p); 68(и, p); 69(E 61,2); 70(и, p); 71(E 38,8); 72(и, p); 73(и, p) |
| 32 | Ge | 68(и, p); 69(E 21,2); 70(и, p); 71(E 27,3); 72(E 7,9); 73(E 37,1); 74(и, p); 75(E 6,5); 76(и, p) |
| 33 | As | 72(и, p); 73(и, p); 74(и, p); 75(E 100); 76(и, p); 77(и, p) |

Продолжение табл. 2

| Порядковый № | Символ эле- мента | Массовое число |
|-----------------|----------------------|--|
| 34 | Se | 74(E 0,9); 75(и, p); 76(E 9,5); 77(E 8,3); 78 (E 24,0); 79(и, p); 80(E 43,0); 81(и, p); 82(E 9,3); 83(и, p); |
| 35 | Br | 78(и, p); 79(E 50,6); 80(и, p); 81(E 49,4); 82(и, p); 83(и, p); 84(и, p); 85(и, p); 87(и, p) |
| 36 | Kr | 78(E 0,35); 79(и, p); 80(E 2,01); 81(и, p); 82 (E 11,53); 83(E 11,53); 83(и, p); 84(E 57,11) |
| 37 | Rb | 82(и, p); 84(и, p); 85(E 72,8); 85(и, p); 86(и, p); 87(E 27,2); 88(и, p); 89(и, p) |
| 38 | Sr | 84(E 0,56); 85(и, p); 86(E 8,86); 87(E 7,02); 87(и, p); 88(E 82,56); 89(и, p); 90(и, p); 91 (и, p) |
| 39 | Y | 87(и, p); 88(и, p); 89(E 100); 90(и, p); |
| 40 | Zr | 91(и, p); 89(и, p); 90(E 48); 91(E 11,5); 92(E 22); 93(и, p); 94(E 17); 95(и, p); 96(E 1,5); 97(и, p); |
| 41 | Nb | 92(и, p); 93(E 100); 94(и, p); 95(и, p) |
| 42 | Mo | 91(и, p); 92(E 14,9); 93(и, p); 94(E 9,4); 95 (E 16,1); 96(E 16,6); 97(E 9,65); 98(E 24,1); 99(и, p) |
| 43 | | 96(и, p); 99(и, p); 101(и, p) |
| 44 | Ru | 95(и, p); 96(E 5,68); 98(E 2,22); 99(E 12,81); 100(E 12,70); 101(E 16,98); 102(E 31,34); 104 (E 18,27); 105(и, p) |
| 45 | Rh | 102(и, p); 103(E 100); 104(и, p); 105(и, p) |
| 46 | Pd | 102(E 0,8); 104(E 9,3); 105(E 22,6); 106(E 27,2); 107(и, p); 108(E 26,8); 109(и, p); 110(E 13,6); 111(и, p); 112(и, p) |
| 47 | Ag | 102(и, p); 104(и, p); 105(и, p); 106(и, p); 107 (E 51,9); 108(и, p); 109(E 43,1); 110(и, p); 111(и, p); 112(и, p) |
| 48 | Cd | 106(E 1,4); 107(и, p); 108(E 1,0); 109(и, p); 110 (E 12,8); 111(E 13,0); 112(E 24,2); 113(E 12,3); 114(E 28,0); 115(и, p); 116(E 7,3); 117(и, p) |
| 49 | In | 110(и, p); 111(и, p); 112(и, p); 113(E 4,5); 114(и, p); 115(E 95,5); 116(и, p); 117(и, p) |
| 50 | Sn | 112(E 21,1); 113(и, p); 114(E 0,8); 115(E 0,4); 116(E 15,5); 117(E 9,1); 118(E 22,5); 119 (E 9,8); 120(E 28,5); 122(E 5,5); 124(E 6,8); 125(и, p) |
| 51 | Sb | 116(и, p); 118(и, p); 120(и, p); 121(E 56); 122 (и, p); 123(E 44); 124(и, p); 127(и, p); 129 (и, p); 132(и, p) |
| 52 | Te | 120(E <1); 121(и, p); 122(E 2,9); 123(E 1,6); 124 (E 4,5); 125(E 6,0); 126(E 19,0); 127(и, p); 128(E 32,9); 129(и, p); 130(E 33,1); 131(и, p); 133(и, p); 135(и, p) |
| 53 | I | 124(и, p); 126(и, p); 127(E 100); 128(и, p); 130 (и, p); 131(и, p); 133(и, p); 135(и, p); 137 (и, p) |
| 54 | Xe | 124(E 0,094); 126(E 0,088); 127(и, p); 129 (E 1,90); 129(E 26,23); 130(E 4,07); 131 (E 21,17); 132(E 24,96); 133(и, p); 134(E 10,54); 135(и, p); 136(E 8,95); 137(и, p); 138(и, p); 139(и, p); 140(и, p) |
| 55 | Cs | 133(E 100); 134(и, p); 138(и, p); 139(и, p); 140 (и, p) |
| 56 | Ba | 130(E 0,101); 132(E 0,097); 133(и, p); 134(E 2,42); 135(E 5,59); 136(E 7,81); 137(E 11,32); 138 (E 71,66); 139(и, p); 140(и, p) |
| 57 | La | 137(и, p); 138(и, p); 139(E 100); 140(и, p) |
| 58 | Ce | 136(E <1); 138(E <1); 139(и, p); 140(E 89); 141 (и, p); 142(E 11); 143(и, p); |

Продолжение табл. 2

| Порядковый № | Символ эле- мента | Массовое число |
|-----------------|----------------------|---|
| 59 | Pr | 140(и, p); 141(E 100); 142(и, p); 143(и, p) |
| 60 | Nd | 141(и, p); 142(E 25,95); 143(E 13,0); 144(E 22,6); 145(E 9,2); 146(E 16,5); 147(и, p); 148(E 6,8); 150(E 5,95); 151(и, p) |
| 62 | Sm | 144(E 3); 147(E 17); 148(E 14); 149(E 15); 150 (E 5); 152(E 26); 154(E 20) |
| 63 | Eu | 150(и, p); 151(E 45,1); 152(и, p); 153(E 50,2); 154(и, p) |
| 64 | Gd | 152(E 0,2); 154(E 2,86); 155(E 15,61); 156 (E 20,59); 157(E 16,42); 158(E 23,45); 159 (и, p); 160(E 20,87); 161(и, p) |
| 65 | Tb | 159(E 100); 160(и, p) |
| 66 | Dy | 158(E 0,1); 160(E 1,5); 161(E 22); 162(E 24); 163 (E 24); 164(E 28); 165(и, p) |
| 67 | Ho | 164(и, p); 165(E 100); 166(и, p) |
| 68 | Er | 162(E 0,1); 164(E 1,5); 165(и, p); 166(E 32,9); 167(E 24,4); 168(E 26,9); 169(и, p); 170 (E 14,2); 171(и, p) |
| 69 | Tm | 169(E 100); 170(и, p) |
| 70 | Yb | 168(E 0,06); 170(E 4,21); 171(E 14,26); 172 (E 21,49); 173(E 17,02); 174(E 29,58); 175(и, p); 176(E 13,39); 177(и, p) |
| 71 | Lu | 175(E 97,5); 176(E 2,5); 178(и, p); 177(и, p) |
| 72 | Hf | 174(E 0,18); 176(E 5,30); 177(E 18,47); 178 (E 27,13); 179(E 13,85); 180(E 35,14); 181(и, p) |
| 73 | Ta | 180(и, p); 181(E 100); 182(и, p) |
| 74 | W | 180(E 0,2); 182(E 22,6); 183(E 17,3); 184(E 30,1); 185(и, p); 186(E 29,8); 187(и, p) |
| 75 | Re | 184(и, p); 185(E 38,2); 186(и, p); 187(E 61,8); 188(и, p) |
| 76 | Os | 184(E 0,018); 186(E 1,59); 187(E 1,64); 188 (E 13,3); 189(E 16,1); 190(E 26,4); 191(и, p); 192(E 41,0); 193(и, p) |
| 77 | Ir | 191(E 38,5); 192(и, p); 193(E 61,5) |
| 78 | Pt | 192(E 0,8); 194(E 30,2); 195(E 35,3); 196(E 26,6); 196(и, p); 197(и, p); 198(E 7,2); 199(и, p) |
| 79 | Au | 196(и, p); 197(E 100); 198(и, p); 199(и, p); 200 (и, p); 202(и, p) |
| 80 | Hg | 196(E 0,15); 197(и, p); 198(E 10,1); 199(E 17,0); 200(E 23,3); 201(E 13,2); 202(E 29,6); 203 (и, p); 204(E 6,7); 205(и, p) |
| 81 | Tl | 200(и, p); 202(и, p); 203(E 29,1); 204(и, p); 205(E 70,9); 206(и, p); 207(E Ac C''); 208 (E Th C''); 210(E Ra C'') |
| 82 | Pb | 203(и, p); 204(E 1,5); 205(и, p); 206(E 23,6); 207(E 22,6); 208(E 52,3); 209(и, p); 210 (E RaD); 211(E AcB); 212(E ThB); 214 (E RaB) |
| 83 | Bi | 207(и, p); 209(E 100); 210(E RaE); 211(E AcC); 212(E ThC); 214(E RaC); |
| 84 | Po | 210(и, p); 211(E AcC); 212(E ThC); 214 (E RaC); 215(E AcA); 216(E ThA); 218 (E RaA) |
| 86 | Rn | 222(E 100) |
| 88 | Ra | 223(E AcX); 224(E ThX); 226(E Ra); 228 (E MsTh) |
| 89 | Ac | 227(E); 228(E MsTh) |
| 90 | Th | 227(E RaAc); 228(E RaTh); 230(E Jo); 231 (E Uy); 232(E 100); 233(и, p); 234(E Ux) |
| 91 | Pa | 231(E); 233(E); 234(E Uz); 234(E Ux) |
| 92 | U | 234(E 0,006); 235(E 0,71); 237(и, p); 238(E 99,2); 239(и, p) |

НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Основные законы и понятия

Закон сохранения массы вещества М. В. Ломоносова. Масса веществ, вступающих в реакцию, всегда равна массе веществ, образовавшихся в результате реакции.

Закон постоянства состава. Откуда и каким бы путём ни было получено

данное химическое вещество, состав его всегда остаётся одним и тем же. При образовании данного вещества элементы всегда соединяются друг с другом в строго определённом весовом соотношении.

Закон кратных соотношений. Если два элемента образуют друг с другом несколько химических соединений, то весовые количества одного из элементов, при-

ходящиеся в этих соединениях на одно и то же количество другого, должны относиться между собой, как целые числа.

Закон Паэв (эквивалентов). Элементы соединяются друг с другом в весовых количествах, пропорциональных их эквивалентам.

Атомный вес — число, показывающее, во сколько раз атом данного элемента тяжелее $\frac{1}{16}$ части веса атома кислорода.

Грамм атом — число граммов, равное атомному весу.

Молекулярный вес — сумма атомных весов или, другими словами, относительная величина, показывающая, во сколько раз молекула данного вещества тяжелее $\frac{1}{16}$ части веса атома кислорода.

Грамм молекулярный вес (грамм моль) — число граммов, равное молекулярному весу.

Эквивалент — весовое количество элемента, соединяющееся с 8 весовыми частями кислорода или заменяющее их в соединениях. Атомный вес элемента всегда является величиной, кратной его эквиваленту.

Грамм эквивалент — число граммов, равное эквивалентному весу.

Валентность — число, показывающее, сколько атомов водорода (или другого одновалентного элемента) может присоединить или заменить атом данного элемента.

Валентность — число, показывающее, сколько эквивалентов содержится в атомном весе. Соотношение $\frac{\text{атомный вес}}{\text{эквивалент}} = \text{валентности}$.

Валентность определяется числом электронов, которые атом отдаёт или принимает, вступая в соединение. Поэтому можно говорить о положительной (число электронов, отданных атомом) и отрицательной (число электронов, принятых атомом) валентности.

Валентность элемента в свободном состоянии равна нулю.

Некоторые элементы обладают переменной валентностью. Для элементов главных групп периодической системы максимальная положительная валентность равна числу электронов на внешней оболочке атома и совпадает поэтому с номером группы, а максимальная отрицательная валентность равна числу электронов, которые могут быть приняты атомом, и поэтому равна 8 минус номер группы.

Химическая символика. Атом каждого элемента обозначается особым, международно принятым знаком. Обычно это первая буква латинского названия элемента, например, O — кислород (Oxygenium), H — водород (Hydrogenium). Иногда символ атома состоит из двух букв его латинского названия, например, Cu — медь (Cuprum). Символ выражает и весовое количество элемента, равное его атомному весу. Так, H соответствует 1,0086 атомной части водорода; O — 16 весовых частей кислорода. Сочетание символов элементов даёт формулу одной молекулы сложного вещества, выражая его качественный и количественный состав. Так, H_2O — формула молекулы воды — показывает, что молекула воды состоит из двух

атомов водорода и одного атома кислорода; формула серной кислоты H_2SO_4 показывает, что в молекулу серной кислоты входят два атома водорода, один атом серы и четыре атома кислорода; O_2 — формула молекулы кислорода — показывает, что она состоит из двух атомов кислорода.

Химическое уравнение есть изображение химической реакции при помощи формул молекул веществ, вступающих в реакцию и образующихся в результате её. Например, реакция образования воды из элементов описывается уравнением $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$, показывающим, что две молекулы водорода, соединяясь с одной молекулой кислорода, дают две молекулы воды.

Стехиометрические расчёты. Химические уравнения служат на практике главным образом для расчётов, связанных с реакцией. Например, чтобы рассчитать, сколько кислорода понадобится для полного сжигания 1 г углерода, пишем уравнение $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$, из которого следует, что для сжигания 12 г углерода требуется 32 г кислорода; следовательно, для сжигания

1 г углерода нужно $\frac{32}{12} = 2,66$ г кислорода.

Электролиты — вещества, дающие в растворах ионы.

Ионы — атомы или группы атомов, обладающие электрическим зарядом. Ионы, несущие положительный заряд, называются катионами; ионы, несущие отрицательный заряд, — анионами. Ион изображается символом элемента, справа сверху которого ставятся знаки зарядов по их числу. Так, катион железа, обладающий двумя зарядами, изображается Fe^{++} или Fe^{2+} ; анион кислотного остатка серной кислоты SO_4^{--} или SO_4^{2-} .

Электролитическая диссоциация (ионизация) — распад молекул электролита на ионы в водных растворах. Молекула, диссоциируя, образует катионы и анионы, сумма зарядов которых равна нулю. Диссоциация — обратимый процесс.

Уравнение диссоциации пишется для сернокислого железа: $\text{FeSO}_4 \rightleftharpoons \text{Fe}^{++} + \text{SO}_4^{--}$;

для серной кислоты $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{--}$; для едкого кали $\text{KOH} \rightleftharpoons \text{K}^+ + \text{OH}^-$.

Степень диссоциации (ионизации) — отношение числа молекул, распавшихся на ионы, к общему числу молекул.

Гидролиз — обратимая реакция обменного разложения между водой и солью. Гидролизу подвергаются соли, образованные: 1) сильной кислотой и слабым основанием, например $\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{HCl}$; 2) сильным основанием и слабой кислотой, например $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{NaOH} + \text{H}_2\text{SiO}_3$; 3) слабой кислотой и слабым основанием, например $\text{CH}_3\text{COONH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COOH} + \text{NH}_4\text{OH}$.

Окислительно-восстановительные реакции — реакции, протекающие с изменением валентности участвующих в них атомов. Увеличение положительной валентности или уменьшение отрицательной валентности связано с потерей атомами

электронов. Этот процесс носит название окисления. Увеличение отрицательной валентности или уменьшение положительной валентности есть восстановление. Восстановление одного вещества всегда происходит за счёт окисления другого, например $2\text{FeCl}_3 + \text{SnCl}_2 = 2\text{FeCl}_2 + \text{SnCl}_4$. В этой реакции два иона железа Fe^{+++} , отнимая два электрона у иона Sn^{++} , переходят в 2Fe^{++} . Ион Sn^{++} , потеряв два электрона, превращается в ион Sn^{++++} . Хлорное железо (FeCl_3) восстанавливается в хлористое (FeCl_2), окисляя двуххлористое олово (SnCl_2) в четырёххлористое (SnCl_4). В этом процессе FeCl_3 — окислитель, SnCl_2 — восстановитель.

Металлы

Элементы, относящиеся к металлам, обладают, как правило, характерным блеском в куске (раздробленные в порошок обычно чёрные), ковкостью, высокой теплопроводностью и электропроводностью. При обычной температуре все металлы, кроме ртути, твёрдые. Окислы металлов (низшие) обладают основными свойствами.

Первые три группы периодической системы, все побочные подгруппы и восьмая группа заняты металлами. В пределах главных групп периодической системы металлические свойства возрастают с увеличением порядкового номера (сверху вниз).

Металлоиды

Элементы, относимые к металлоидам, не обладают блеском и ковкостью. Электропроводность и теплопроводность металлоидов малы. Окислы металлоидов (высшие) обладают кислотными свойствами. Типичные металлоиды: галоиды, сера, фосфор.

Основные типы химических соединений

Окислы. Все элементы, кроме инертных газов, соединяются с кислородом. Получающиеся при этом соединения называются окислами. Некоторые элементы образуют несколько окислов, например FeO , Fe_2O_3 ; N_2O , NO , NO_2 , N_2O_5 .

Основания. Окислы металлов, соединяясь с водой, образуют гидраты окислов, называемые основаниями. Растворимые в воде основания называются щелочами. В растворах основания дают ионы металла, заряженные положительно и отрицательно заряженные ионы гидроксила OH' .

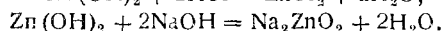
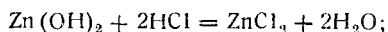
Растворы различных оснований одинаковой концентрации вследствие различной степени ионизации дают различную концентрацию ионов OH' . Чем больше степень ионизации основания, тем выше концентрация ионов OH' , тем сильнее основание.

Кислоты. Окислы металлоидов, соединяясь с водой, дают кислоты. Такие окислы называются ангидридами соответствующих кислот. В растворах кислоты образуют положительно заряженные ионы (катионы) H' и отрицательные ионы (анионы) кислотного остатка. Существуют также кислоты, не имеющие ангидридов и не содержащие в молекуле кислорода, но при ионизации дающие также ионы H' , например, HCl ,

HBr , H_2S и т. п., так называемые бескислородные кислоты. Чем больше степень ионизации кислоты (тем большую концентрацию ионов H' она создаёт), тем сильнее кислота. Кислоты, при полной ионизации дающие один ион H' , носят название одноосновных. Кислоты, при полной ионизации дающие несколько ионов H' , называются многоосновными, например H_2SO_4 , дающая при полной ионизации два H' , — двухосновная кислота; H_3PO_4 — трёхосновная кислота.

Амфотерные окислы. Некоторые окислы, соединяясь с водой, дают гидраты окислов, понижающиеся одновременно в двух направлениях: как основание, давая ионы OH' , и как кислота, давая ионы H' . Такие окислы называются амфотерными, например, $2\text{H}' + \text{ZnO} \rightleftharpoons \text{Zn}(\text{OH})_2 \rightleftharpoons \text{Zn}^{++} + 2\text{OH}'$.

Амфотерные гидраты окисей реагируют и с кислотами и с основаниями, давая соли:



Обычно, если металл образует несколько окислов, то низшие обладают основными свойствами, средние амфотерны, а высшие обладают кислотными свойствами.

Соли — продукт замещения ионов водорода в кислоте ионами металлов или, что то же, продукт замещения ионов гидроксила в основании ионами кислотного остатка.

Средние соли — продукт полного замещения ионов водорода в кислоте ионами металлов. При ионизации средние соли дают катионы металлов и анионы кислотного остатка.

Кислые соли — продукт неполного замещения ионов водорода в многоосновной кислоте ионами металлов. При полной ионизации в растворах дают катионы металла, катионы водорода и анионы кислотного остатка, например KHSO_4 — кислый сернокислый калий, NaH_2PO_4 — кислый фосфорнокислый натрий (однозамещённый).

Основные соли — продукт неполного замещения гидроксильных анионов основания кислотными анионами. В растворах основные соли дают катионы металла, анионы гидроксила и анионы кислотного остатка, например $\text{Bi}(\text{OH})(\text{NO}_3)_2 \rightleftharpoons \text{Bi}^{+++} + \text{OH}' + 2\text{NO}_3^-$.

Двойные соли — продукт замещения катионов водорода в кислоте на катионы двух металлов, например $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$.

Смешанные соли — продукт замещения одним катионом металла катионов водорода в двух кислотах, например CaOCl_2

или $\text{Ca} \begin{matrix} \text{OCl} \\ \text{Cl} \end{matrix}$ — кальциевая соль соляной и хлорноватой кислот.

ЭЛЕМЕНТЫ НУЛЕВОЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ (ИНЕРТНЫЕ ГАЗЫ)

В нулевой группе стоят газообразные элементы: гелий He_2^4 , неон Ne_{10}^{20} , аргон Ar_{18}^{40} , криптон Kr_{36}^{84} , ксенон Xe_{54}^{131} и радон

Rn^{222}_{86} , не образующие химических соединений, поэтому они названы инертными или благородными газами. Молекулы инертных газов состоят из одного атома. Инертные газы содержатся в воздухе (около 1%). Основную массу составляет аргон, остальные лишь в незначительных количествах. Гелий, аргон и иногда неон встречаются в газах минеральных источников. Гелий как продукт радиоактивного распада встречается в радиоактивных минералах. Все инертные газы бесцветны и не обладают запахом. Гелий применяется для наполнения дирижаблей, газовых термометров и для получения самых низких температур. Неон и аргон используют для наполнения световых трубок.

ЭЛЕМЕНТЫ ГЛАВНОЙ ПОДГРУППЫ ПЕРВОЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Водород H^1_1

В природе в свободном виде встречается в газах вулканических извержений. В связанном состоянии очень распространен, являясь составной частью воды и всех органических веществ.

Свойства. Водород — лёгкий газ без цвета и запаха, со взрывом сгорает в кислороде, образуя воду: $2H_2 + O_2 = 2H_2O$. Хранится в стальных баллонах под давлением. Является энергичным восстановителем, особенно в момент выделения в результате какой-либо реакции. Атомы водорода быстро соединяются в молекулы с большим выделением тепла $H + H = H_2 + 105$ кк. Атомный водород применяется для сварки тугоплавких металлов и сплавов. При помощи водородной горелки можно получить температуры до $4000^\circ C$.

С кислородом водород даёт два соединения: воду H_2O и перекись водорода H_2O_2 .

Перекись водорода H_2O_2 . Чистая перекись водорода представляет собой голубоватую жидкость, легко распадающуюся на воду и кислород, являясь поэтому сильным окислителем. Попадая на кожу, вызывает сильные ожоги. Перекись водорода применяется как окислитель в ракетных двигателях. 3—1%-ные растворы H_2O_2 применяются в медицине как дезинфицирующее средство.

Литий Li^7_3

Серебристо-белый лёгкий мягкий металл. В свободном виде в природе не встречается. Встречается только в связанном виде в минералах. Легко окисляется, покрываясь на воздухе плёнкой оксида Li_2O . При незначительном подогревании вспыхивает и сгорает в Li_2O . С водой бурно реагирует, выделяя водород и давая гидрат оксида $LiOH$, представляющий собой сильную щёлочь.

Натрий Na^{23}_{11}

В природе встречается только в виде соединений. Наиболее распространённые: хлористый натрий (каменная соль), альбит

(алюмосиликат натрия), криолит Na_3AlF_6 , мирабилит $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$, чилийская селитра $NaNO_3$.

Свойства. Натрий — серебристо-белый мягкий металл. На воздухе покрывается плёнкой оксида Na_2O . С водой бурно реагирует, вспыхивая и выделяя водород $2Na + 2H_2O = 2NaOH + H_2$. Хранят металлический натрий погружённым в керосин в железной посуде. Применяется Na для приготовления перекиси, при органическом синтезе, а также как сильный восстановитель.

Оксид натрия Na_2O образуется при медленном окислении натрия с недостатком кислорода. Оксид натрия бурно растворяется в воде, давая гидрат окиси — сильную щёлочь.

Перекись натрия Na_2O_2 — светложёлтое твёрдое вещество, образуется при горении натрия на воздухе и в кислороде. Na_2O_2 — сильный окислитель, обугливающий бумагу, дерево. Из воздуха поглощает углекислоту, выделяя кислород $2Na_2O_2 + 2CO_2 = 2Na_2CO_3 + O_2$, поэтому применяется для очистки воздуха в закрытых помещениях (подводные лодки и т. п.). Применяется также как отбеливающее вещество. В воде Na_2O_2 растворяется с сильным разогреванием, образуя перекись водорода и едкую щёлочь. Хранится в запаянных железных банках.

Гидрат окиси натрия $NaOH$ (едкий натр, каустическая сода) — белое твёрдое вещество. На воздухе расплывается, поглощая влагу. Поглощает углекислоту. В воде легко растворяется с сильным разогреванием. Сильная щёлочь. Гидрат окиси натрия применяется в мыловаренной и красочной промышленности, при производстве искусственного волокна, при белили тканей, при очистке нефтепродуктов, при производстве бумаги и во многих других отраслях промышленности.

Сода $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ — белое кристаллическое, растворимое в воде вещество. Один из главных продуктов основной химической промышленности. Применяется в стекольной, мыловаренной и бумажной промышленности. Хранится в деревянных барабанах. Безводный карбонат натрия Na_2CO_3 называется кальцинированной содой.

Бикарбонат натрия $NaHCO_3$ — белое кристаллическое вещество, растворимое в воде.

Соли натрия. Натрий образует большое число солей со всеми кислотами. Важнейшие: поваренная соль $NaCl$; растворимое стекло Na_2SiO_3 ; гипосульфит натрия $Na_2S_2O_3$; сульфит натрия Na_2SO_3 ; сульфид натрия Na_2S . Все — белые кристаллические вещества, растворимые в воде.

Калий K^{39}_{19}

В природе калий встречается только в виде соединений: калиевый полевой шпат $KAlSi_3O_8$, калиевая слюда $KH_2Al_2Si_2O_{12}$, карналлит $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$, сильвин KCl , сильвинит $KCl \cdot NaCl$.

Свойства. Серебристо-белый мягкий металл. На воздухе покрывается плёнкой

окисла. С водой реагирует со взрывом $2K + 2H_2O = 2KOH + H_2$, поэтому, так же как и Na, хранится погруженным в керосин в железной посуде.

Гидрат окиси калия (едкий кали) KOH — белое твердое вещество, расплывающееся на воздухе, поглощающее углекислый газ. Хранится в закрытой железной посуде. Раствор гидрата окиси калия в воде — сильная щелочь. KOH дороже едкого натрия, поэтому применяется реже. Основной потребитель — мыловаренная промышленность.

Соли калия применяются в сельском хозяйстве как удобрения. Минералы сильвин KCl, карналлит KCl·MgCl₂·6H₂O и др. непосредственно после грубого размола могут употребляться как ценные калийные удобрения.

Нитрат калия KNO₃ — белое кристаллическое вещество. Применяется при производстве пороха и органических красителей.

Иодистый и бромистый калий KJ и KBr — белые кристаллические вещества, растворимые в воде.

Углекислый калий (поташ) K₂CO₃ — белый порошок, легко растворяющийся в воде. Применяется в стекольной промышленности, в сельском хозяйстве.

Рубидий Rb⁸⁵₃₇, Цезий Cs¹³³₅₅

Относятся к наиболее редко встречающимся металлам. Лишь небольшие количества их находятся в некоторых минералах и минеральных водах. Эти металлы сами загораются на воздухе. Их гидраты окисей — самые сильные из известных щелочей.

ЭЛЕМЕНТЫ ПОБОЧНОЙ ПОДГРУППЫ ПЕРВОЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Медь Cu⁶⁴₂₉

В природе редко встречается в свободном состоянии. Чаще в виде своих соединений: медный колчедан CuFeS₂, медный блеск CuS, CuCO₃·Cu(OH)₂ — малахит, Cu₂O — красная медная руда.

Свойства. Медь представляет собой металл характерного красноватого цвета, хорошо проводит ток и тепло. При нагревании на воздухе переходит в окислы: Cu₂O — закись меди и CuO — окись меди. Соответственно образует два ряда солей: соли одновалентной меди и двухвалентной меди. Легко соединяется с галоидами, давая соли. Медь широко применяется главным образом в виде сплавов с другими металлами (латунь, бронза и др.).

Соли меди. Сульфат меди CuSO₄ — белый порошок, жадно притягивающий воду, переходя в CuSO₄·5H₂O — медный купорос — синие кристаллы. Применяется в сельском хозяйстве для борьбы с вредителями, при производстве искусственного волокна. Хлорная медь CuCl₂·2H₂O — зеленые кристаллы; применяется в протектике (зеленые краски). Все соли меди ядовиты.

Серебро Ag¹⁰⁸₄₇

В природе встречается в самородном состоянии, но основная масса серебра добывается из руд. Важнейшие руды: серебряный блеск Ag₂S, роговое серебро AgCl. В большем или меньшем количестве серебро в качестве примеси находится в медных и особенно свинцовых рудах.

Свойства. Мягкий тягучий металл, лучше всех металлов проводит тепло и электрический ток. В чистом виде не применяется из-за мягкости. Применяются сплавы с большим или меньшим количеством меди. Серебро — одновалентный металл.

Азотнокислое серебро (ляпис) AgNO₃ — белые кристаллы. Применяется в медицине для прижигания ран.

Хлористое серебро AgCl — белый, не растворимый в воде порошок, постепенно темнеет на свету, разлагаясь с выделением металлического серебра. Такими же свойствами обладают бромистое AgBr и иодистое серебро AgI. Галоидные соли серебра применяются в фотографии.

Золото Au¹⁹⁷₇₉

В природе встречается почти всегда в самородном состоянии.

Свойства. Яркий блестящий металл, очень ковкий. Ввиду мягкости употребляется исключительно в сплавах с серебром и медью. Химически малоактивный металл. На воздухе даже при сильном нагревании не изменяется. Из кислот золото растворяется только в «царской водке» (смесь 1 ч. HNO₃ и 3 ч. HCl), превращаясь в желтые игольчатые кристаллы золотохлористоводородной кислоты H[AuCl₄].

Существует два окисла золота: Au₂O — закись золота и Au₂O₃ — окись золота, и соответственно два ряда солей: соли одновалентного и соли трёхвалентного золота. Все соединения золота легко разлагаются при нагревании с выделением металлического золота.

ЭЛЕМЕНТЫ ГЛАВНОЙ ПОДГРУППЫ ВТОРОЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Бериллий Be⁹₄

В природе мало распространен. Входит в состав некоторых минералов, из которых наиболее распространен берилл Be₃Al₂(SiO₃)₃. Некоторые разновидности берилла, окрашенные примесями в различные цвета, являются драгоценными камнями (изумруды, аквамарин).

Бериллий — твердый белый легкий металл. Применяется главным образом в некоторых легких сплавах. Дает очень тугоплавкий окисел. Металлические свойства выражены слабо. Гидрат окиси амфотерен.

Магний Mg²⁴₁₂

В природе магний довольно распространен. Важнейшие минералы: магнезит MgCO₃, доломит MgCO₃·CaCO₃, серпентинный

магний MgSO_4 и хлористый магний MgCl_2 , входят в состав минералов канцита и карналлита, а также содержатся в морской воде, сообщая ей горький вкус. Магний входит в состав асбеста.

Свойства. Магний — серебристо-белый очень лёгкий металл. Применяется для приготовления различных лёгких сплавов. Из них особенно ценен «электрон» (90% Mg, остальное Al, Zn, Sn, Mn), применяемый в авиационной и автомобильной промышленности. Магний на воздухе покрывается тонкой плёнкой окисла, защищающей металл от дальнейшего окисления. При нагревании Mg вспыхивает ярким пламенем (используется при фотосафировании и в осветительных ракетах) и сгорает в MgO . Магний при нагревании медленно разлагает воду с выделением H_2 . В кислотах растворяется легко с выделением водорода и образованием соответствующей соли.

Гидрат окиси магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$ — белый порошок. Обладает основными свойствами, представляя собой основание средней силы.

Сульфат магния или горькая соль $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — белые кристаллы, растворимые в воде.

Основной хлорид магния $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$, «цемент Сореля», применяется в качестве вяжущего материала при изготовлении мельничных жерновов, точильных камней. Смесь цемента Сореля с древесными опилками (ксилолит) употребляется для покрытия полов.

Кальций Ca_{20}^{40}

В природе очень широко распространён в виде своих соединений, главным образом карбоната кальция CaCO_3 (мел, известняк, мрамор), а также в виде гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и фосфоритов $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Кальций входит в состав многочисленных силикатов.

Свойства. Кальций — ковкий твёрдый белый металл, на воздухе покрывается плёнкой окисла, а при нагревании сгорает ярким красноватым пламенем. Из горячей воды довольно быстро вытесняет водород, образуя гидрат окиси: $\text{Ca} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2$. Кальций очень активный металл, легко соединяющийся с галогенами, серой, азотом, водородом. При нагревании восстанавливает окислы почти всех металлов. Металлический Ca применяется в некоторых сплавах со свинцом для изготовления подшипников.

Окись кальция (негашёная или жжёная известь) CaO — белое тугоплавкое вещество, поглощающее воду с сильным разогреванием, переходя при этом в гидрат окиси кальция, или гашёную известь.

Гидрат окиси кальция (гашёная известь) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ — белый порошок, обладает свойствами довольно сильного основания. Применяется в строительной технике в смеси с песком и водой — «цементовый раствор» — для связывания кирпичей. Гашёная известь входит в состав штукатурки.

Важнейшие соли кальция

Хлористый кальций CaCl_2 — белое вещество, жадно поглощающее воду. Приме-

няется для высушивания многих органических жидкостей.

Сернокислый кальций $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — белое вещество, при нагревании до 155°C теряет одну молекулу воды, переходя в жёсткий гипс, или алебастр. Алебастр, замешанный на воде, даёт тесто, довольно быстро затвердевающее, снова превращаясь в кристаллогидрат. Безводный CaSO_4 называется ангидритом.

Азотнокислый кальций $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ — бесцветные кристаллы, растворимые в воде. Кальциевая селитра является прекрасным удобрением.

Белильная известь CaOCl_2 — белый порошок, сильный окислитель, широко применяется для дезинфекции и как дегазатор.

Стронций Sr_{38}^{88}

В природе мало распространён, встречается в виде целестина SrSO_4 и стронцианита SrCO_3 .

Свойства. Стронций — очень активный двухвалентный белый металл, быстро разлагает воду и окисляется на воздухе, легко соединяется непосредственно со многими элементами. Гидрат окиси стронция $\text{Sr}(\text{OH})_2$ — сильное основание. Соли стронция применяются в пиротехнике, так как они окрашивают пламя в красный цвет.

Барий Ba_{56}^{137}

В природе встречается в виде барита BaSO_4 и витерита BaCO_3 в сравнительно больших количествах.

Свойства. Барий — очень активный двухвалентный серебристо-белый металл, быстро разлагает воду и окисляется на воздухе. Гидрат окиси бария $\text{Ba}(\text{OH})_2$ — сильное основание. Соли бария ядовиты.

Радий Ra_{88}^{226}

В природе довольно распространён, но содержание его в рудах ничтожно. Самая богатая радием урановая руда содержит около 0,2 г радия на 1 т, поэтому получить его очень трудно и он дорог.

Свойства. Радий — серебристого цвета, довольно мягкий металл, разлагающий воду при обыкновенной температуре; по химическим свойствам он похож на барий.

Радий относится к ряду радиоактивных веществ, являясь промежуточным звеном распада урана (см. Радиоактивность, стр. 320).

Соли радия светятся в темноте. Испускаемые ими лучи обладают способностью вызывать многие химические реакции: вода распадается на водород и кислород, аммиак — на азот и водород и т. д. Многие вещества начинают светиться, когда на них попадают лучи радия. Лучи радия разрушают ткани организма, убивают бактерий.

ЭЛЕМЕНТЫ ПОБОЧНОЙ ПОДГРУППЫ ВТОРОЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

ЭЛЕМЕНТЫ

Цинк Zn_{30}^{65}

Важнейшие руды: цинковая обманка (серпентинный цинк) ZnS , галмей (карбонат цинка) ZnCO_3 .

Свойства. Синевато-белый двухвалентный металл, на воздухе покрывается тонким слоем основного карбоната, что предохраняет его от дальнейшего окисления. С водой не реагирует. Легко растворяется в разведённых кислотах, давая соответствующие соли и водород. Растворяется также в щёлочах, образуя цинкаты и водород, так как гидрат окиси цинка амфотерен.

Гидрат окиси цинка $Zn(OH)_2$ — белое не растворимое в воде вещество, растворимо в кислотах $Zn(OH)_2 + 2HCl = ZnCl_2 + 2H_2O$ и в щёлочах $Zn(OH)_2 + 2NaOH = Na_2ZnO_2 + 2H_2O$. Амфотерный характер гидрата окиси цинка выражен очень отчётливо. Растворы сернокислого цинка и хлористого цинка применяются для пропитки дерева во избежание его гниения. Соли цинка ядовиты.

Кадмий Cd_{48}^{112}

В природе встречается в рудах вместе с цинком.

Свойства. Двухвалентный металл, по внешнему виду напоминает цинк. На воздухе не окисляется, поэтому служит для кадмирования, покрытия других металлов с целью предохранения от коррозии. Кадмий применяется как компонент легкоплавких сплавов. Гидрат окиси кадмия обладает в отличие от цинка только основными свойствами. Сернистый кадмий CdS применяется как жёлтая краска.

Ртуть Hg_{80}^{201}

В природе встречается изредка в самородном состоянии в виде вкраплений в горные породы, но главным образом в виде сернистой ртути — HgS киновари яркокрасного цвета, применяющейся как краска.

Свойства. Ртуть — единственный жидкий металл при обыкновенной температуре. Из металлов данной подгруппы ртуть наименее активна. На воздухе при обыкновенной температуре не окисляется. Существуют два окисла ртути: закись ртути Hg_2O — чёрного цвета и окись ртути HgO — красного цвета. Оба окисла при нагревании разлагаются с выделением металлической ртути. Гидраты окислов ртути не существуют.

Металлическая ртуть применяется для наполнения различных физических приборов: термометров, барометров и т. д. Много ртути используется для приготовления гремучей ртути — $Hg(OCN)_2$, одного из важнейших детонаторов, которым наполняют разные запалы.

Амальгамы. Ртуть растворяет в себе многие металлы, образуя иногда жидкие, иногда твёрдые сплавы, называемые амальгами. Амальгама натрия применяется как восстановитель, амальгамы олова и серебра — для пломбирования зубов. Золото особенно легко даёт амальгамы. Поэтому ртуть применяют для извлечения золота из породы. Пары ртути очень ядовиты даже в той концентрации, которая создаётся при обыкновенной температуре. Перевозят ртуть в железных бутылках, так как железо не образует амальгамы.

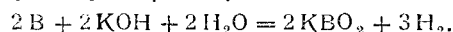
Соли ртути. Существует два ряда солей ртути: соли одновалентной и двухвалентной ртути. Каломель — хлорид одновалентной ртути Hg_2Cl_2 — белое, не растворимое в воде вещество, применяемое в медицине. Сулема — хлорид двухвалентной ртути $HgCl_2$ — белые кристаллы, растворимые в воде. 1%-ный водный раствор её применяется в медицине как дезинфектор. Все соли ртути сильно ядовиты.

ЭЛЕМЕНТЫ ГЛАВНОЙ ПОДГРУППЫ ТРЕТЬЕЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Бор B_5^{11}

В природе мало распространён. Встречается в виде кислородных соединений: борной кислоты H_3BO_3 и буры $Na_2B_4O_7$.

Свойства. Бор — довольно инертный трёхвалентный металлоид. С кислородом соединяется только при высокой температуре, давая борный ангидрид B_2O_3 . В воде бор не растворим, растворяется в щёлочах:



Борная кислота H_3BO_3 — белое кристаллическое вещество, растворимое в воде. Кислота очень слабая.

Алюминий Al_{13}^{27}

В природе алюминий встречается чаще всех металлов, входя в состав глин, полевых шпатов, слюд и многих других минералов. Важными рудами являются криолит $AlF_3 \cdot 3NaF$ и боксит $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$.

Свойства. Серебристо-белый трёхвалентный металл, легко прокатывается в проволоку и тонкие листы. На воздухе покрывается тонким слоем окисла, который предохраняет металл от дальнейшего окисления. С водой алюминий не реагирует. Разведённые серная и соляная кислоты растворяют алюминий с образованием солей. Холодная азотная кислота не действует на алюминий. Щёлочи легко растворяют алюминий с образованием алюминатов.

Окись алюминия (глинозём) Al_2O_3 встречается в природе в кристаллическом виде, образуя корунд, по твёрдости уступающий только алмазу. Кристаллы корунда, окрашенные в красный и синий цвета, — драгоценные камни: рубин и сапфир.

Гидрат окиси алюминия $Al(OH)_3$. Типичный амфотерный гидрат окиси. Даёт два ряда солей, растворяясь в кислотах и щёлочах. В последнем случае он даёт соли металалюминиевой кислоты — $HAIO_2$, называемые алюминатами.

Хлористый алюминий $AlCl_3$. Безводный хлористый алюминий представляет собой белые кристаллы, дымящие во влажном воздухе вследствие гидролиза, приводящего к образованию соляной кислоты. Хранится в закрытых железных барабанах. Применяется как катализатор при органических синтезах.

Сернокислый алюминий $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ белые кристаллы. Применяется для очистки воды и в бумажном производстве.

Алюминиевые квасцы $KAl(SO_4)_3 \cdot 12H_2O$ белые кристаллы. Применяются для дубления кож и как протрава при крашении тканей.

Галлий Ga_{31}^{70} , Индий In_{49}^{115} , Таллий Tl_{81}^{204}

В природе встречаются крайне редко. Свойства. В свободном состоянии все три элемента представляют собой серебристо-белые мягкие металлы. На воздухе они довольно устойчивы, воду не разлагают, в кислотах растворяются легко, а галлий и индий растворяются также и в щелочах. Кроме максимальной валентности они могут проявлять и более низкие степени положительной валентности. Для таллия, например, характерны соединения, в которых он одновалентен. Гидроксиды галлия и индия амфотерны, а $Tl(OH)_3$ обладает только основными свойствами.

ЭЛЕМЕНТЫ ПОВОБОЧНОЙ ПОДГРУППЫ ТРЕТЬЕЙ ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Скандий Sc_{21}^{45} , Иттрий Y_{39}^{89}

В природе скандий и иттрий встречаются очень редко, входя вместе с целым рядом других, сходных по химическим свойствам элементов в состав некоторых минералов, так называемых иттриевых земель. Свойства свободных металлов скандия и иттрия изучены пока мало, так как получить их в чистом виде очень трудно. В соединениях скандий и иттрий положительно трёхвалентны. Оксиды и гидраты оксидов этих металлов обладают свойствами оснований. Соли скандия и иттрия бесцветны и большинство из них легко растворимо в воде. Соединения скандия и иттрия практического применения пока не нашли.

Редкие земли, или лантаниды

Название «редкие земли» объединяет 15 элементов (один из них ещё не открыт) от порядкового номера 57 до номера 71: лантан La_{57}^{139} , церий Ce_{58}^{140} , празеодим Pr_{59}^{141} , неодим Nd_{60}^{144} , 61, самарий Sm_{62}^{150} , европий Eu_{63}^{152} , гадолиний Gd_{64}^{157} , тербий Tb_{65}^{159} , диспрозий Dy_{66}^{162} , гольмий Ho_{67}^{165} , эрбий Er_{68}^{167} , туллий Tm_{69}^{169} , иттербий Yb_{70}^{173} и кассиопей Sr_{71}^{175} .

В природе редкие земли распространены мало и обычно встречаются в смеси друг с другом, а также с цирконием, гафнием и торием. Вследствие большого сходства этих элементов разделение их очень сложно, поэтому лишь немногие из них (La, Ce, Pr и Nd) получены в чистом виде, а некоторые вообще мало изучены. В свободном состоянии они представляют собой тугоплавкие металлы. Воду они разлагают или при обыкновенной температуре или при небольшом нагревании. При этом образуются водород и соответствующий гидрат оксида. Легко растворяются в разбавленных кисло-

тах, образуя соответствующие соли. Все лантаниды обнаруживают валентность +3; церий, празеодим и тербий, кроме того, могут быть четырёхвалентными, а самарий, европий и иттербий — двухвалентными. Все гидраты оксидов лантанидов обладают явно выраженными свойствами оснований.

Актиний Ac_{89}^{227}

Актиний встречается вместе с радием в урановых рудах. Содержание актиния в этих рудах ничтожно. В чистом виде актиний не выделен. Актиний радиоактивен. В соединениях актиний трёхвалентен. Соединения актиния пока почти не изучены.

ЭЛЕМЕНТЫ ГЛАВНОЙ ПОДГРУППЫ ЧЕТВЁРТОЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Углерод C_6^{12}

В природе углерод — один из самых распространённых элементов; встречается как в свободном, так и в связанном виде. Свободный углерод встречается в виде двух простых веществ — алмаза и графита. Ископаемый каменный уголь близок по своему составу к чистому углероду. Соединения углерода очень распространены в виде нефти, солей угольной кислоты (главным образом кальциевых: известняк, мел, мрамор). Воздух всегда содержит углекислый газ. Растения и животные построены из веществ, главной составной частью которых является углерод. Для углерода известно громадное количество соединений. Изучено несколько сотен тысяч их, в то время как для всех других элементов, вместе взятых, насчитывается не более 25—30 тыс. соединений.

Соединения, содержащие углерод, водород и другие элементы, рассматриваются в специальном разделе химии «Органическая химия».

Свойства. В свободном состоянии для углерода известны три аллотропических видоизменения — алмаз, графит и уголь (аморфный углерод).

Алмаз — бесцветное кристаллическое вещество, сильно преломляющее световые лучи. Встречается в виде небольших кристаллов. Алмаз — одно из самых твёрдых веществ и поэтому находит широкое применение для обработки различных твёрдых материалов, для резки стекла, для бурения горных пород. Шлифованные алмазы — бриллианты. При нагревании без доступа воздуха алмаз переходит в графит.

Графит — тёмносерое кристаллическое, мягкое вещество. На воздухе не горит даже при сильном накаливании. Сгорает при накаливании в чистом кислороде, превращаясь в CO_2 . Графит в смеси с глиной идёт для изготовления огнеупорных тиглей для плавления металлов. В смеси с маслом или водой применяется как смазочное вещество.

Угольный ангидрид CO_2 и угольная кислота H_2CO_3 . CO_2 — газ без цвета и запаха, образующийся при горении различных, содержащих углерод веществ. CO_2 выделяется при дыхании животных. Под давлением CO_2

превращается в жидкость, хранящуюся в стальных баллонах. При выливании из баллона вследствие испарения отнимается так много тепла, что CO_2 превращается в твёрдую белую массу, которая, не плавясь, возгорается при -79°C . Твёрдый угольный ангидрид «сухой лёд» нашёл широкое применение для охлаждения скоропортящихся продуктов, особенно при перевозках, а также в других случаях, когда требуется низкая температура. Угольный ангидрид растворяется в воде, образуя очень слабую угольную кислоту H_2CO_3 . Кислота в свободном состоянии не существует; при попытках выделить её она разлагается на CO_2 и H_2O . Существует лишь в растворах небольшой концентрации.

Соли угольной кислоты. Угольная кислота как двухосновная даёт два ряда солей: средние (карбонаты) и кислые (бикарбонаты), со слабыми основаниями даёт основные соли. Карбонаты некоторых металлов (например Al) полностью разлагаются водой. Все карбонаты, кроме карбонатов щелочных металлов, не растворимы в воде и разлагаются при нагревании: $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$.

Бикарбонаты при нагревании переходят в карбонаты. Большинство бикарбонатов значительно растворимо в воде.

Оксид углерода CO . Газ без цвета и запаха, ядовит. С водой не реагирует. Оксид углерода горит на воздухе, образуя угольный ангидрид. На солнечном свете или в присутствии катализаторов оксид углерода соединяется с хлором, образуя очень ядовитый газ фосген COCl_2 .

Сероуглерод CS_2 —бесцветная летучая жидкость, при долгом хранении желтеет и приобретает отвратительный запах. CS_2 ядовит, очень легко воспламеняется и поэтому требует большой осторожности при работе с ним. Применяется для борьбы с вредителями в сельском хозяйстве и при производстве вискозы.

Синильная кислота (цианистоводородная) HCN —бесцветная очень летучая жидкость, обладает характерным запахом горького миндаля. Один из самых сильных ядов.

Цианистый калий KCN —бесцветное кристаллическое вещество. Ядовит так же сильно, как синильная кислота. На воздухе разлагается углекислым газом: $2\text{KCN} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{K}_2\text{CO}_3 + 2\text{HCN}$. Обладает способностью растворять золото и серебро. Применяется для извлечения их из руд.

Кремний Si_{14}^{28}

В природе кремний — один из самых распространённых элементов. Он составляет около 28% доступной нашему исследованию земной оболочки, входя в состав многих минералов (силикатов — солей кремневой кислоты), а также в виде кварца SiO_2 (кремневого ангидрида).

Свойства. Кремний существует в аморфном и кристаллическом состоянии. В соединениях Si четырёхвалентен. При обыкновенной температуре он довольно инертен, соединяясь непосредственно только с фтором. При нагревании аморфный кремний легко сгорает, образуя кремневый ангид-

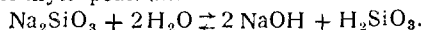
рид. При нагревании соединяется с хлором, образуя четырёххлористый кремний SiCl_4 — бесцветную жидкость, разлагаемую водой с образованием соляной и кремневой кислот $\text{SiCl}_4 + 3\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SiO}_3 + 4\text{HCl}$. Если испарять SiCl_4 во влажном воздухе, образуется густой белый дым; поэтому SiCl_4 применяют как дымообразователь. В кислотах кремний не растворяется, но легко реагирует со щелочами: $\text{Si} + 2\text{KOH} + \text{H}_2\text{O} = \text{K}_2\text{SiO}_3 + 2\text{H}_2$. Иногда эта реакция употребляется для получения водорода. С углеродом Si даёт карбид SiC (карборунд), по твёрдости приближающийся к алмазу. С металлами даёт силициды (например Mg_2Si).

Кремневый ангидрид SiO_2 . Кремневый ангидрид (кремнезём, кварц), кислотный оксид — наиболее характерное и устойчивое соединение кремния. Природные разновидности SiO_2 горный хрусталь, аметист, дымчатый топаз, кремнь. Кварц — основная составная часть песка. SiO_2 не растворим в воде, очень тугоплавок. Кислоты, кроме плавиковой (HF), не действуют на SiO_2 .

Кремневая кислота. Кремневому ангидриду соответствует очень слабая кремневая кислота H_2SiO_3 . Соли её называются силикатами. Кремневая кислота — белая твёрдая полупрозрачная масса, пронизанная громадным количеством пор и обладающая поэтому большой поверхностью. Её под названием силикагеля используют для поглощения различных газов и паров, а также для очистки смазочных масел.

Кремневый ангидрид образует много различных кремневых кислот, отличающихся соотношением SiO_2 и воды в молекуле. Состав многих из них точно неизвестен; общее название их — поликремневые кислоты.

Силикаты. Соли кремневых кислот очень распространены в природе: полевые шпаты, слюды, глина, асбест, тальк и многие другие. В воде растворимы только силикаты щелочных металлов Na_2SiO_3 и K_2SiO_3 , носящие название растворимых стёкол. Так как кремневая кислота очень слабая, то растворимое стекло вследствие гидролиза имеет щелочную реакцию



Стекло. Сплавы смесей различных силикатов друг с другом или с кремнезёмом представляют собой аморфные прозрачные твёрдые тела и называются стёклами. Обыкновенное оконное стекло, которое идёт и на изготовление основной массы стеклянной посуды, представляет собой сплав силикатов кальция и натрия с кремнезёмом; его приблизительная формула: $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$. Примеси железа придают стеклу зелёную окраску (бутылочное стекло). Цветные стёкла готовят добавлением в расплавленную массу стекла небольших количеств различных веществ: Fe_2O_3 — даёт зелёное стекло, MnO_2 — лилово-красное, CoO — синее, ничтожные количества металлического золота окрашивают стекло в рубиново-красный цвет и т. д.

Кварцевое стекло, получаемое плавлением при очень высокой температуре кварца, обладает рядом ценных качеств: не задержи-

вает ультрафиолетовых лучей, прочнее обыкновенного, обладает ничтожным коэффициентом расширения при нагревании.

Цемент — продукт, получаемый прокаливанием смеси глины с известняком. При прокаливании образуются силикаты алюминия и кальция. При замешивании цемента с водой получается тестообразная, быстро твердеющая даже под водой масса; смесь цемента с водой и песком (цементный раствор), а также смесь этого раствора с гравием, щебнем (бетон) широко применяются в строительной технике.

Германий Ge_{32}^{73}

Один из наиболее редких элементов; применение его очень ограничено. На воздухе не окисляется, воды не разлагает. Оба оксида германия GeO и GeO_2 имеют амфотерный характер. Его соединения с галоидами разлагаются водой, подобно SiCl_4 .

Олово Sn_{50}^{119}

В природе встречается изредка в самородном состоянии, чаще же в виде оловянного камня SnO_2 .

Свойства. Олово существует в трёх модификациях. Белое олово — серебристо-белый мягкий металл, легко прокатывается в тонкие листы — станиоль. Если изделия из белого олова подвергаются длительному действию низкой температуры, то на них появляются серые пятна («оловянная чума»). Это объясняется переходом белого олова в другую модификацию — серое олово. Серое олово при нагревании снова переходит в белое. При нагревании олова выше 161°C оно переходит в третью модификацию, которая отличается своей хрупкостью: легко толчется в порошок, разбивается, как стекло. При обыкновенной температуре олово на воздухе не окисляется, применяется поэтому для покрытия металлов, а также в виде сплавов: бронза, баббиты и др. В расплавленном состоянии постепенно переходит на воздухе в SnO_2 . С водой Sn не реагирует, растворяется в концентрированной соляной кислоте с образованием SnCl_2 . Растворяется в щелочах, давая станинты. Образует два оксида — SnO и SnO_2 — и соответственно два ряда соединений — двух- и четырёхвалентного олова. SnO и SnO_2 — амфотерные оксиды, но у двухвалентного олова металлические свойства выражены сильнее, чем у четырёхвалентного. Соли двухвалентного олова сравнительно легко переходят в соли четырёхвалентного и являются поэтому восстановителями.

Свинец Pb_{82}^{207}

В природе свинец встречается в виде различных соединений. Наиболее важная руда — свинцовый блеск PbS .

Свойства. Голубовато-серый тяжёлый мягкий металл, на воздухе покрывается защитной плёнкой оксида. Вода на свинец не действует, но в присутствии воздуха свинец медленно разрушается водой. На

кислот легче всего свинец растворяется в азотной и уксусной (в присутствии кислорода воздуха): $\text{Pb} + 4\text{HNO}_3 = \text{Pb}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{NO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. Свинец легко растворяется в щелочах с образованием плумбитов — солей H_2PbO_2 . Свинец широко применяется для изготовления покрышек для кабеля, пластин для аккумуляторов, для изготовления пулемётных и шрапнельных пуль, дробин и т. д. В своих соединениях свинец положительно двухвалентен. Имеются соединения четырёхвалентного свинца, но они менее устойчивы, чем у олова.

Все растворимые соединения свинца ядовиты. Свинец образует два простых оксида — PbO и PbO_2 .

Оксид свинца PbO — жёлтый порошок, после сильного прокаливания приобретает красноватый цвет (глёт); применяется для изготовления пластин в аккумуляторах.

Гидрат окиси свинца $\text{Pb}(\text{OH})_2$ — амфотерное соединение, растворимо в щелочах и кислотах: $\text{Pb}(\text{OH})_2 + 2\text{HNO}_3 = \text{Pb}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{H}_2\text{O}$; $\text{Pb}(\text{OH})_2 + 2\text{NaOH} = \text{Na}_2\text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$.

Уксуснокислый свинец $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb}$ (свинцовый сахар) — белое кристаллическое вещество; применяется при крашении тканей. Ядовит.

Основной карбонат свинца $\text{Pb}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{PbCO}_3$ — свинцовые белила; применяется для изготовления белой масляной краски.

Двухкисль свинца PbO_2 — тёмнобурый порошок, амфотерный окисел с преобладанием кислотных свойств; ему соответствуют орто- и метасвинцовые кислоты: H_4PbO_6 и H_2PbO_4 , не существующие в свободном состоянии, но образующие соли.

Сурик Pb_3O_4 — яркочерного цвета; применяется при изготовлении масляной краски. Представляет собой соль двухвалентного свинца и ортоосвинцовой кислоты Pb_2PbO_4 .

ЭЛЕМЕНТЫ ПОБОЧНОЙ ПОДГРУППЫ ЧЕТВЁРТОЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Титан Ti_{22}^{48}

В природе довольно распространён. Получается обычно в виде сплава с железом — ферротитана — и применяется в металлургии.

Свойства. Металл с максимальной положительной валентностью, равной 4. По отношению к воде и воздуху довольно устойчив. $\text{Ti}(\text{OH})_4$ — гидроксид титана амфотерен.

Двухкисль титана TiO_2 — белый порошок, не растворимый в воде. Служит для изготовления очень прочной масляной краски — титановых белил.

Цирконий Zr_{40}^{91} , Гафний Hf_{72}^{179}

В природе оба металла мало распространены и имеют ограниченное применение. В свободном состоянии имеют вид типичных металлов. При обыкновенной температуре устойчивы по отношению к воде и воздуху. В своих соединениях четырёхвалентны.

Торий Th²³²₉₀

В природе торий встречается довольно редко. Главным образом вместе с редкими землями входит в состав минерала монацита. По внешнему виду этот металл похож на платину. Радиоактивен.

ЭЛЕМЕНТЫ ГЛАВНОЙ ПОДГРУППЫ ПЯТОЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Азот N¹⁴₇

В природе азот находится в свободном состоянии, составляя 78% воздуха. В связанном состоянии встречается в виде солей азотной кислоты. Входит в состав молекулы животного и растительного белка.

Свойства. Бесцветный, не обладающий запахом газ. В химическом отношении очень инертен. Только при очень высокой температуре соединяется с кислородом и водородом.

Аммиак NH₃ — бесцветный газ с характерным резким запахом (запах нашатырного спирта). При охлаждении до температуры — 33,4°C аммиак сжижается. Жидкий аммиак хранится в стальных баллонах под давлением 6—7 ат. Аммиак горит в кислороде, давая воду и азот: $4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 = 6\text{H}_2\text{O} + 2\text{N}_2$.

Аммиак легко растворяется в воде. Раствор имеет щелочную реакцию. 5%-ный раствор называется нашатырным спиртом. Аммиак реагирует с кислотами, образуя соли аммония $2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 = (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Группа аммония NH₄⁺, имеющая один положительный заряд, в соединениях аналогична катиону металла. В свободном виде аммоний не существует.

Аммиак широко применяется в холодильном деле для производства азотной кислоты и для получения аммонийных удобрений.

Сернокислый аммоний (NH₄)₂SO₄ — белое кристаллическое вещество, хорошо растворимое в воде. Применяется как удобрение, входит в состав взрывчатого вещества аммонала.

Хлористый аммоний (нашатырь) NH₄Cl — белое кристаллическое вещество, хорошо растворимое в воде. Применяется в красильном деле, при паянии и лужении.

Оксиды азота

Азотный ангидрид N₂O₅ — твердое кристаллическое вещество, растворяется в воде, давая азотную кислоту. Многие органические вещества при соприкосновении с ним воспламеняются. Сильный окислитель.

Четырёхокись азота N₂O₄ — при низкой температуре слегка желтоватая жидкость. При нагревании переходит в двуокись азота.

Двуокись азота NO₂ — бурый газ с характерным запахом. Ядовит.

Азотистый ангидрид N₂O₃ — известен только при низкой температуре в виде темной жидкости; ему соответствует азотистая кислота HNO₂.

Оксид азота NO — бесцветный газ, на воздухе моментально бурест, переходя в NO₂.

Закись азота («веселящий газ») N₂O — бесцветный газ без запаха, вдыхание небольших количеств которого вызывает состояние, подобное опьянению.

Азотная кислота HNO₃ — бесцветная жидкость, дымящая на воздухе, так как её пары сгущают влагу воздуха. Растворяется в воде в любых отношениях. Обыкновенная продажная азотная кислота (окрашенная обычно двуокисью азота в желтоватый цвет) известна под названием дымящей азотной кислоты. Азотная кислота довольно легко разлагается при хранении, особенно на свету: $4\text{HNO}_3 = 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{NO}_2 + \text{O}_2$. Чем концентрированнее кислота и чем выше температура, тем легче идёт разложение. По химическим свойствам азотная кислота представляет собой одну из наиболее сильных кислот. Азотная кислота — один из самых сильных окислителей. Попадая на кожу, вызывает тяжёлые ожоги. Нагретые деревянные опилки загораются от капли азотной кислоты. От азотной кислоты загораются многие органические вещества, например скиншлар. Все металлы, за исключением золота, платины и некоторых редких металлов, растворяются в азотной кислоте. Хранят азотную кислоту в стеклянных бутылках, помещённых в плетёные корзины или деревянные ящики. Переносить бутылки с азотной кислотой и переливать кислоту нужно с крайней осторожностью, следя, чтобы капли не попадали на кожу или одежду, а также не могли попасть на какие-нибудь легковоспламеняющиеся вещества.

Азотная кислота применяется в больших масштабах при производстве удобрений, органических красителей, серной кислоты, взрывчатых веществ и во многих других отраслях промышленности.

Соли азотной кислоты (нитраты)

Азотнокислый натрий («чилийская селитра») NaNO₃ — белое кристаллическое вещество, хорошо растворимое в воде.

Нитрат калия KNO₃ — белое кристаллическое вещество, растворимое в воде; применяется для изготовления дымного пороха.

Азотнокислый кальций (кальциевая селитра) Ca(NO₃)₂ — белое кристаллическое вещество, растворимое в воде; служит прекрасным удобрением.

Фосфор P³¹₁₅

В природе фосфор довольно распространён в виде соединений. В свободном состоянии не встречается. Наиболее важные природные соединения: фосфорит Ca₃(PO₄)₂; апатит кроме Ca₃(PO₄)₂ содержит CaF₂ или CaCl₂. Фосфор, как и азот, входит в состав животного и растительного белка. Большое количество фосфора содержится в костях животных.

Свойства. Фосфор существует в нескольких аллотропических видоизменениях.

Белый фосфор. Твердое кристаллическое бесцветное или слегка желтоватое вещество. На воздухе окисляется и поэтому светится в темноте; при очень слабом нагревании или

даже при трении белый фосфор вспыхивает на воздухе. Хранят белый фосфор под водой, чтобы предохранить его от окисления. С водой не реагирует. Растворим в сероуглероде. Белый фосфор — сильный яд.

Красный фосфор по своим свойствам резко отличается от белого: очень медленно окисляется на воздухе, не светится в темноте, не растворяется в сероуглероде и неядовит. Красный фосфор применяется в спичечной промышленности.

Фосфор — типичный металлоид, довольно активный в свободном состоянии. Он соединяется непосредственно с многими элементами.

Фосфорный ангидрид P_2O_5 , белый порошок, жадно поглощающий воду. Поэтому на воздухе распыляется, притягивая влагу и переходя в метафосфорную кислоту. Хранится герметически закупоренным.

Фосфорные кислоты

В зависимости от температуры фосфорный ангидрид может присоединять различное количество воды, образуя три фосфорные кислоты: $P_2O_5 + H_2O = 2 HPO_3$ — метафосфорная кислота, $P_2O_5 + 2 H_2O = H_4P_2O_7$ — пиррофосфорная кислота, $P_2O_5 + 3 H_2O = 2 H_3PO_4$ — ортофосфорная кислота.

Метафосфорная кислота HPO_3 — твердое бесцветное вещество, хорошо растворимое в воде, ядовита.

Ортофосфорная кислота H_3PO_4 — твердое бесцветное вещество, хорошо растворимое в воде, неядовита. H_3PO_4 — трёхосновная кислота и образует три ряда солей (фосфатов): средние Na_2HPO_4 , кислые однозамещённые (первичные) NaH_2PO_4 и кислые двузамещённые (вторичные) Na_2HPO_4 .

Соли фосфорной кислоты

Соли фосфорной кислоты имеют большое значение для сельского хозяйства как удобрения.

Суперфосфат — смесь первичного фосфата кальция $Ca(H_2PO_4)_2$ с гипсом $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ — белый или серый порошок. Первичный фосфат кальция хорошо растворим в воде. Наиболее распространённое фосфорное удобрение.

Преципитат — серый порошок. Содержит вторичный фосфат кальция $CaHPO_4$, не растворим в воде, но растворим в кислотах, находящихся в почвах. Применяется как удобрение.

Аммофосы — различные фосфаты аммония. Важнейшим является диаммофос: $(NH_4)_2HPO_4$. Аммофосы ценны как удобрения тем, что кроме фосфора содержат азот.

Мышьяк As_{75}^{75}

В природе мышьяк встречается главным образом в виде соединений.

Свойства. Мышьяк — тёмносерое вещество с металлическим блеском, очень хрупкое, довольно хорошо проводит ток и тепло. При нагревании возгорается, не плавясь. При накаливании на воздухе сгорает с характерным чесночным запахом, образуя

мышьяковистый ангидрид As_2O_3 — белое кристаллическое вещество, довольно плохо растворимое в воде с образованием амфотерной мышьяковистой кислоты H_3AsO_3 , известной лишь в растворах.

С кислородом мышьяк образует ещё один окисел, в котором он пятивалентен.

Мышьяковый ангидрид As_2O_3 — белая стекловидная масса. Мышьяковая кислота H_3AsO_4 — белое твердое вещество, растворимое в воде. Амфотерна, но кислотные свойства выражены сильнее, чем у H_3AsO_3 . Все соединения мышьяка ядовиты. Подобно азоту, мышьяк образует соединения с водородом.

Мышьяковистый водород AsH_3 (арсин) — бесцветный газ с чесночным запахом; очень ядовит. При нагревании разлагается с выделением мышьяка.

Соли мышьяковой кислоты (арсенаты) и соли мышьяковистой кислоты (арсениты) применяются в сельском хозяйстве для борьбы с вредными насекомыми.

Сурьма Sb_{51}^{122}

В природе сурьма встречается главным образом в виде сурьмяного блеска Sb_2S_3 .

Свойства. В свободном состоянии Sb представляет собой серебристо-белое твердое вещество с металлическим блеском. Sb применяется в сплавах. По химическим свойствам сурьма похожа на мышьяк, но металлические свойства у неё выражены сильнее. С водородом образует сурьмянистый водород SbH_3 — ядовитый газ. С кислородом образует два окисла, обнаруживая валентность, равную 3 и 5.

Трёх- и пятисернистая сурьма Sb_2S_3 и Sb_2S_5 — красные порошки — применяются как наполнители и красители резины.

Висмут Bi_{83}^{209}

В природе висмут встречается и в свободном виде и в виде соединений висмутовой охры Bi_2O_3 и висмутового блеска Bi_2S_3 .

Свойства. Блестящий красновато-белый металл. При обыкновенной температуре на воздухе не окисляется. При накаливании даёт Bi_2O_3 — окисел, обладающий только основными свойствами.

Гидрат окиси висмута $Bi(OH)_3$ — белый порошок, не растворимый в воде. Представляет собой слабое основание.

Азотнокислый висмут $Bi(NO_3)_3$ — белые кристаллы, растворяющиеся в воде с образованием основной соли $Bi(NO_3)_2 + H_2O = Bi(OH)(NO_3)_2 + HNO_3$.

ЭЛЕМЕНТЫ ПОБОЧНОЙ ПОДГРУППЫ ПЯТОЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Ванадий V_{23}^{51}

В природе ванадий довольно распространён, но его соединения очень рассеяны и не образуют значительных скоплений, поэтому его считают редким элементом.

Свойства. Ванадий — серовато-белый очень твердый лёгкий металл. На воздухе не окисляется. Не реагирует с соляной и

серной кислотами. Растворяется в азотной кислоте, «царской водке» и плавиковой кислоте; с кислородом образует VO , V_2O_3 , VO_2 и V_2O_5 . Ванадиевый ангидрид V_2O_5 — твердое вещество оранжевого цвета, обладает кислотным характером. Свободная ванадиевая кислота HVO_3 не выделена, существуют только её соли — ванадаты. Двухкислородная VO_2 амфотерна, а низшие окислы VO и V_2O_3 проявляют только основные свойства.

Ванадий применяется при производстве особых сортов стали. Ванадиевая сталь, содержащая 0,1—0,3% ванадия, обладает ценными механическими свойствами.

Ванадиевый ангидрид и ванадаты применяются в химической промышленности в качестве катализаторов при получении серной кислоты, заменяя платину.

Ниобий Nb_{41}^{93} , Тантал Ta_{73}^{181}

Ниобий и тантал встречаются в природе значительно реже, чем ванадий. В свободном состоянии ниобий и тантал представляют собой металлы серого цвета, тугоплавкие, твердые. Эти металлы не растворимы во всех кислотах даже в «царской водке». Исключением является плавиковая кислота, которая действует на металлические Nb и Ta. Растворы щелочей на Nb и Ta не действуют, но их можно растворить в расплавленных щелочах с образованием солей, в которых Nb и Ta входят в состав аниона. Nb и Ta применяются для изготовления полюсов катодных ламп. Ниобий за последнее время находит широкое применение при изготовлении специальных сталей. Стали, содержащие Nb, применяются для изготовления сварных конструкций, так как Nb резко повышает прочность сварных швов. Ta применяется в сплаве с углеродом, обладающем высокой твердостью, для изготовления наконечников резцов и сверл. Сплавы тантала с другими металлами применяются для изготовления некоторых мелких изделий: часовых пружин, сверл, наконечников зубо-врачебных инструментов и т. п. Для Nb и Ta наиболее типичны соединения, в которых они пятивалентны. Соединения Nb и Ta пока не нашли технического применения.

Протактиний Pa_{91}^{231}

В природе мало распространен, встречается в урановых рудах. Pa — тяжелый радиоактивный металл серебристо-белого цвета, не окисляющийся на воздухе. В химическом отношении протактиний ещё мало изучен.

ЭЛЕМЕНТЫ ГЛАВНОЙ ПОДГРУППЫ ШЕСТОЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Кислород O_{8}^{16}

В природе кислород встречается чаще всех элементов. В свободном состоянии он входит в состав воздуха. В связанном виде входит в состав воды, различных минералов и горных пород. Общее количество кислорода в наружной оболочке земного шара (воз-

дух, вода, земная кора) составляет около 50%.

Свойства. Кислород — газ без цвета и запаха. При низкой температуре под высоким давлением может быть превращён в жидкость, которая хранится и перевозится в стальных баллонах под давлением 150 ат. Жидкий кислород в смеси с горючими материалами (угольный порошок, масло) обладает сильными взрывчатыми свойствами.

Кислород соединяется со многими веществами с выделением тепла и света. Этот процесс называется горением. Горение в чистом кислороде происходит гораздо энергичнее, чем на воздухе. Дыхание представляет собой процесс окисления, доставляющий живым организмам необходимую энергию.

Во всех соединениях кислород имеет валентность — 2. Молекула кислорода состоит из двух атомов.

Кислород применяют для получения высоких температур, сжигая в нём, в специальных горелках, ацетилен или водород. Кислород применяется также в химической промышленности. Дожженный процесс может быть интенсифицирован, если вместо воздуха будет подаваться смесь воздуха с кислородом.

Озон. Кислород в свободном состоянии может существовать в двух аллотропических видоизменениях: в виде обыкновенного кислорода O_2 и в виде озона, молекула которого состоит из 3 атомов кислорода. Озон O_3 — бесцветный газ с характерным запахом. При сильном охлаждении озон переходит в синюю жидкость. Жидкий озон легко взрывает.

В химическом отношении озон является более сильным окислителем, чем кислород. Как сильный окислитель озон убивает бактерии и применяется поэтому для обеззараживания воды и воздуха.

Сера S_{16}^{32}

В природе сера встречается как в свободном состоянии, так и в виде различных соединений. Многие природные соединения серы с металлами (сульфиды металлов) являются ценными рудами (например свинцовый блеск PbS , медный блеск CuS , цинковая обманка ZnS и др.). Большое распространение в природе имеют также соли серной кислоты (сульфаты) CaSO_4 , MgSO_4 и др.

Свойства. Сера существует в нескольких аллотропических видоизменениях.

Природная сера представляет собой твердое желтое вещество, кристаллизующееся в ромбической системе.

Черная сера состоит из таких же кристаллов. Если расплавленную серу медленно охлаждать, то осаждаются желтые кристаллы моноклинической серы, при дальнейшем охлаждении переходящие в ромбическую серу.

Если расплавленную серу вылить в холодную воду, то она превратится в мягкую резиноподобную коричневую массу. Это видоизменение носит название пластической серы. Через несколько часов пластическая

сера светлеет, твердеет и переходит в ромбическую.

По химическим свойствам сера представляет собой типичный металлоид. Она соединяется непосредственно со многими элементами. С металлами она образует сульфиды. С кислородом даёт два окисла: SO_2 — сернистый газ — ангидрид сернистой кислоты и SO_3 — серный ангидрид, которому соответствует серная кислота. С водородом сера образует сероводород H_2S . Таким образом, для серы в её соединениях известны валентности —2, +4 и +6.

Сероводород H_2S — бесцветный газ с характерным запахом тухлых яиц. Ядовит. Сероводород горит на воздухе: $2\text{H}_2\text{S} + 3\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{SO}_2$. Смесь сероводорода с воздухом взрывоопасна. Сероводород обладает очень сильными восстановительными свойствами. В воде сероводород растворяется, образуя сероводородную воду, обладающую свойствами очень слабой кислоты. Соли этой кислоты называются сульфидами.

Сернистый ангидрид (сернистый газ) SO_2 — бесцветный газ с характерным запахом горячей серы. SO_2 легко сжижается в бесцветную жидкость, которая хранится и перевозится в стальных баллонах. SO_2 применяется для белил шерсти, шёлка и как дезинфицирующее вещество. SO_2 растворяется в воде, образуя сернистую кислоту H_2SO_3 .

Сернистая кислота H_2SO_3 — очень непрочное соединение, может существовать только в растворе. H_2SO_3 обладает восстановительными свойствами, окисляясь в H_2SO_4 . Как двухосновная кислота образует два ряда солей: средние соли — сульфиты и кислые соли — бисульфиты.

Бисульфит натрия NaHSO_3 — белое кристаллическое вещество, хорошо растворимое в воде.

Бисульфит кальция $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$ — белое кристаллическое вещество, растворимое в воде.

Серный ангидрид SO_3 — кристаллическое прозрачное вещество, жадно соединяющееся с водой, давая серную кислоту $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_4$. Эта реакция протекает с сильным разогреванием. Попадая на кожу, SO_3 даёт сильные ожоги.

Серная кислота H_2SO_4 — чистая серная кислота «моногидрат» — представляет собой маслянистую жидкость, при температуре $10,5^\circ\text{C}$ затвердевающую в кристаллическую массу. Продажная серная кислота, называемая купоросным маслом, содержит 96,5% H_2SO_4 и имеет уд. вес 1,84. Серная кислота может растворять в себе значительные количества SO_3 , образуя так называемые олеумы. Серная кислота жадно поглощает воду, отнимая её даже у таких веществ, как клетчатка. Этим объясняется сбулживание бумаги, дерева и других веществ, если на них попадет серная кислота. Попадая на кожу, вызывает тяжёлые ожоги. Концентрированная серная кислота не действует на железо, поэтому её можно перевозить в железных цистернах. Наибольшее количество серной кислоты хранится и перевозится в стальных бочках, защищённых от ударов плетью или коромыслом.

нами с соломой. При разбавлении серной кислоты водой выделяется очень много тепла. Серная кислота является одной из наиболее сильных кислот. Серная кислота как двухосновная кислота образует средние соли (сульфаты) и кислые соли (бисульфаты).

Купоросы

Купоросы — сульфаты меди, железа, цинка и некоторых других металлов, содержащие кристаллизационную воду.

Медный купорос $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ — синие кристаллы, растворимые в воде.

Железный купорос $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — светло-зелёные кристаллы, растворимые в воде.

Квасцы алюминия $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ — белые кристаллы, растворимые в воде.

Селен Se_{34}^{79}

В природе селен встречается главным образом в качестве примеси вместе с сульфидами Pb, Fe и др.

В свободном состоянии Se существует, подобно сере, в нескольких аллотропических видоизменениях. Ничтожная электропроводность одного из них сильно увеличивается при освещении. На этом основано применение селена в фотометрах и фотоэлементах.

По химическим свойствам селен является типичным металлоидом и похож на серу.

Теллур Te_{52}^{128}

В природе теллур мало распространён. Свободный теллур известен в двух модификациях — аморфной и кристаллической. Кристаллический Te светлосерого цвета, обладает значительной электропроводностью и теплопроводностью.

По химическим свойствам теллур — металлоид, однако его металлоидные свойства выражены не так интенсивно, как у серы и селена.

Полоний Po_{84}^{210}

В природе полоний встречается в урановых рудах. Полоний обладает очень высокой радиоактивностью. Препараты, содержащие очень незначительное количество полония, по своей активности превосходят чистые препараты радия. С химической стороны полоний почти не изучен.

ЭЛЕМЕНТЫ ПОБОЧНОЙ ПОДГРУППЫ ШЕСТОЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Хром Cr_{24}^{52}

В природе хром встречается главным образом в виде хромистого железняка $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$.

Свойства. Хром представляет собой твёрдый белый блестящий металл. Воздух и вода при обыкновенной температуре не действуют на хром. Cr применяется в металлепромышленности. Сталь, содержащая 1—2% Cr, обладает высокой прочностью и твёрдостью. Хромовые стали идут на изготовление броневых плит, оружейных стве-

лов, инструментов и различных машинных частей. Нержавеющая сталь содержит около 12% Cr. Хром применяется также для покрытия других металлов с целью предохранения их от коррозии (хромирование). С кислородом хром образует три окисла: закись хрома CrO , обладающую основными свойствами, окись хрома Cr_2O_3 — амфотерное соединение и хромовый ангидрид CrO_3 — типичный кислотный окисел.

Окись хрома Cr_2O_3 — зелёный порошок, не растворимый в воде. Применяется для изготовления клеевой и масляной краски (зелёный крас).

Хромовые квасцы $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ — синие-фиолетовые кристаллы, растворимые в воде. Применяются в качестве протравы при крашении тканей и для хромового дубления кожи.

Хромовый ангидрид CrO_3 — тёмнокрасные кристаллы, растворимые в воде с образованием хромовой H_2CrO_4 и двухромовой $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ кислот. Сильный окислитель. Некоторые органические вещества воспламеняются, если в них попадает CrO_3 .

Хроматы

Хроматы — соли хромовой кислоты, существующей только в растворах.

Хромат свинца PbCrO_4 — не растворимое в воде яркожёлтое вещество; применяется при изготовлении масляной краски «жёлтый крас».

Хромовокислые натрий и калий Na_2CrO_4 и K_2CrO_4 — жёлтые кристаллические вещества, растворимые в воде.

Бихромат калия $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ — крупные оранжевые кристаллы, растворимые в воде. $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ — сильный окислитель, применяющийся при производстве многих органических соединений в кожевенной промышленности, текстильной и др. Соли хромовых кислот ядовиты.

Молибден Mo^{96}_{42}

В природе молибден встречается главным образом в виде MoS_2 — молибденового блеска.

Свойства. Серебристо-белый металл, на воздухе устойчив при обыкновенной температуре и сгорает при накаливании в белый молибденовый ангидрид MoO_3 . Молибден применяется для изготовления специальных сортов стали. Молибденовые стали отличаются большой твёрдостью, упругостью и применяются для изготовления броневых плит, ружейных и орудийных стволов и т. п. В соединениях молибден обнаруживает валентности +6, +5, +4, +3 и +2. Наиболее устойчивы соединения шестивалентного молибдена. Соли молибденовой кислоты H_2MoO_4 — молибдаты — часто имеют очень сложный состав (комплексные соли).

Молибдат аммония $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ — белое кристаллическое вещество, растворимое в воде.

Вольфрам W^{184}_{74}

В природе вольфрам встречается главным образом в виде солей вольфрамовой кислоты H_2WO_4 . Наиболее важные руды: вольфра-

мит — железная и марганцевая соли вольфрамовой кислоты, кристаллизующиеся вместе с $\text{FeMn}(\text{WO}_4)_2$, и шеллит — вольфрамовокислый кальций CaWO_4 .

Свойства. Вольфрам — тяжёлый белый металл, самый тугоплавкий из всех металлов. На воздухе окисляется только при накаливании докрасна.

Вольфрам применяется в металлургии для приготовления быстрорежущей инструментальной стали. Сталь, содержащая 18—22% W, не теряет твёрдости даже при накаливании докрасна. Вольфрам применяется также для изготовления нитей в электролампах. Нити из вольфрама выдерживают нагревание до белого каления практически не испаряясь.

Карбиды вольфрама WC и W_2C — вещества, по твёрдости близкие к алмазу. Они входят в состав «сверхтвёрдых» сплавов. «Победит» состоит из карбидов W с добавкой 10% металлического кобальта.

Уран U^{238}_{92}

Свойства. Уран — тяжёлый белый радиоактивный металл. Уже при слабом нагревании загорается на воздухе, давая смешанный окисел U_3O_8 , легко соединяется с галогенами, серой, растворяется в разбавленных кислотах с образованием солей четырёхвалентного урана. Вытесняет водород из тёплой воды. Уран образует большое число соединений. Наиболее характерны соединения шестивалентного урана. К ним относятся соли урановой H_2UO_4 и диурановой $\text{H}_2\text{U}_2\text{O}_7$ кислот, а также соли уранила, в которых роль металла играет двухвалентный ион UO_2 , например $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ — азотно-кислый уранил — жёлтое кристаллическое вещество, растворимое в воде.

Уран в настоящее время приобрёл большое значение как источник энергии (см. Цепной распад урана, стр. 323).

ЭЛЕМЕНТЫ ГЛАВНОЙ ПОДГРУППЫ СЕДЬМОЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ (ГАЛОГЕНЫ)

Фтор F^{19}_9

В природе фтор встречается чаще всего в виде плавикового шпата.

Свойства. Фтор — газ зеленовато-жёлтого цвета с характерным запахом. Ядовит. В химическом отношении фтор типичный металлоид. Чрезвычайно активен, непосредственно соединяется со многими элементами; с водородом соединяется со взрывом, образуя фтористый водород. Фтор очень сильный окислитель.

Фтористый водород HF — бесцветный газ с резким запахом, легко сжижается. На воздухе он дымит, притягивая влагу. В воде растворяется неограниченно. Раствор HF в воде называется плавиковой кислотой. Из всех галоидоводородных кислот плавиковая кислота самая слабая. Отличительным свойством HF является его способность взаимодействовать с кремневым ангидридом с образованием газообразного фтористого кремния: $\text{SiO}_2 + 4\text{HF} = \text{SiF}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$.

Это свойство HF используют для нанесения на стекло рисунков, надписей и приготовления матового стекла. Плавиковую кислоту поэтому нельзя хранить в стеклянной посуде; её хранят в парафиновых бутылках или в стеклянных, покрытых слоем парафина.

Хлор Cl_{17}^{35}

В природе хлор встречается только в связанном виде. Важнейшим природным соединением хлора является поваренная соль NaCl .

Свойства. Хлор — газ жёлто-зелёного цвета с резким запахом; ядовит. Под давлением около 6 ат сжижается. Хранится и перевозится в жидком состоянии в стальных баллонах.

Химически хлор очень активен, соединяется со многими элементами, особенно энергично с металлами, давая соли соляной кислоты. Cl_2 обладает сильными окислительными свойствами. На этом основано применение хлора для стерилизации питьевой воды. Хлор используется для приготовления белильной извести, при производстве красок и лекарственных веществ, в сельском хозяйстве для борьбы с полевыми вредителями и во многих других отраслях промышленности и народного хозяйства. С водородом хлор соединяется особенно хорошо на солнечном свете, образуя хлористый водород HCl . С кислородом непосредственно не соединяется. Кислородные соединения получают косвенным путём; наиболее устойчивы соли кислородных кислот хлора. Известны четыре кислородные кислоты: хлорноватистая HClO (соли называются гипохлоритами), хлористая HClO_2 (соли называются хлоритами), хлорноватая HClO_3 (соли называются хлоратами), хлорная HClO_4 (соли называются перхлоратами). Все кислородные соединения хлора — сильные окислители.

Хлористый водород и соляная кислота. Хлористый водород — бесцветный газ с резким запахом, хорошо растворим в воде. Раствор хлористого водорода в воде называется соляной кислотой. Насыщенный водный раствор HCl при температуре 18° содержит 48% HCl . Продажная концентрированная соляная кислота содержит около 38% HCl и имеет $d = 1,19$. Такая кислота дымит на воздухе вследствие выделения HCl , который притягивает влагу из воздуха, образуя туман. Соляная кислота является одним из главных продуктов основной химической промышленности для получения хлористых металлов, изшатыря, в кожевенной промышленности, в пищевой и многих других. Соляная кислота, входя в состав желудочного сока животных, играет важную роль в пищеварении. Соли соляной кислоты называются хлоридами. Наиболее важные из них описаны в разделах соответствующих металлов.

Бром Br_{35}

В природе бром встречается в виде соединений с натрием, калием, магнием. Обычно они встречаются вместе с соединениями хлора, но значительно менее распространены.

Свойства. Бром представляет собой тяжёлую красно-бурюю жидкость с резким запахом. Попадая на кожу, вызывает тяжёлые ожоги. Жидкий бром легко испаряется, образуя красно-бурные пары, вдыхание которых вызывает отравление.

По химическим свойствам бром — металлоид менее активный, чем фтор и хлор. С водородом бром образует бромистый водород HBr , по свойствам похожий на HCl , но значительно менее прочный. Из кислородных кислот для брома известны только бромноватистая HBrO и бромноватая HBrO_3 кислоты. Эти кислоты тоже менее устойчивы, чем соответствующие им у хлора.

Иод I_{53}^{127}

В природе иод содержится в виде соединений, главным образом в морской воде и в буровых водах нефтяных скважин. Иод накапливается в тканях морских водорослей, которые и служат источником получения иода.

Свойства. Иод — твёрдое вещество, образующее темносерые кристаллы со слабым металлическим блеском. При нагревании эти кристаллы, не плавясь, переходят в темнофиолетовые пары с характерным запахом. По химическим свойствам иод — металлоид, но значительно менее активен, чем хлор и бром. С водородом иод образует иодистый водород — непрочное соединение, распадающееся на иод и водород. Из кислородных кислот для иода известны иодноватая HIO_3 и иодная HIO_4 .

ЭЛЕМЕНТЫ ПОБОЧНОЙ ПОДГРУППЫ СЕДЬМОЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Марганец Mn_{25}^{55}

В природе соединения марганца довольно распространены. Чаще всего он встречается в виде кислородных соединений: пиролюзита MnO_2 , гаусманита Mn_3O_4 и браунита Mn_2O_3 .

Свойства. Марганец представляет собой твёрдый блестящий металл, похожий по внешнему виду на железо. На воздухе покрывается плёнкой оксида, задерживающей дальнейшее окисление. Марганец растворяется в разбавленных кислотах с образованием соответствующих солей с катионом двухвалентного марганца.

С кислородом образует пять оксидов: MnO , Mn_2O_3 , MnO_2 , Mn_2O_7 . Оксиды двух- и трёхвалентного марганца имеют основной характер, окисел четырёхвалентного марганца амфотерен и высшие оксиды (шести- и семивалентного Mn) обладают кислотными свойствами.

Двускись марганца MnO_2 — коричневый порошок, не растворимый в воде. Применяется как окислитель.

Марганцовокислый калий (перманганат) KMnO_4 — соль марганцевой кислоты — темнофиолетовое кристаллическое вещество, растворимое в воде. Обладает сильными окислительными свойствами. Применяется как дезинфицирующее вещество, а также как окислитель в химической промышленности.

Рений Re_{75}^{186}

Очень редкий металл, мало исследованный.

ЭЛЕМЕНТЫ ВОСЬМОЙ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Железо Fe_{26}^{56}

В природе железо после алюминия — наиболее распространённый металл. Встречается только в виде соединений. Важнейшими железными рудами являются: магнитный железняк Fe_3O_4 , красный железняк Fe_2O_3 , бурый железняк $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, шпатовый железняк FeCO_3 , железный колчедан, или пирит, FeS_2 .

Свойства. Железо — серебристо-белый блестящий металл. В сухом воздухе железо не изменяется, но во влажном быстро ржавеет, покрываясь рыхлым бурым налётом гидрата окиси железа, который не предохраняет металл от дальнейшего окисления. При накаливании в воздухе железо сгорает, образуя Fe_3O_4 (закись — окись железа). В разбавленных кислотах железо легко растворяется с образованием соответствующих солей двухвалентного железа. Щёлочи не действуют на железо. Fe образует два окисла: закись железа FeO и окись железа Fe_2O_3 . Окислы обладают только основными свойствами, давая два ряда солей двухвалентного и трёхвалентного железа.

Кобальт Co_{27}^{59}

В природе кобальт мало распространён, он встречается в виде кобальтового шпата CoAs_2 и кобальтового блеска CoAsS .

Свойства. Кобальт — твёрдый сероватый блестящий металл, обладающий магнитными свойствами, устойчивый по отношению к воде и воздуху, растворяется в разведённых кислотах с образованием соответствующих солей с двухвалентным катионом кобальта. С кислородом образует два окисла CoO и Co_2O_3 , которые обладают основными свойствами, давая соли. Соли трёхвалентного кобальта неустойчивы и переходят в соли двухвалентного. Соли двухвалентного кобальта в безводном состоянии синего цвета, в водных растворах и кристаллах, содержащих воду, — красного или розового. Кобальт входит в состав некоторых сплавов, сообщая им большую твёрдость (победит, стеллит).

Никель Ni_{28}^{59}

В природе никель встречается главным образом в виде соединений с мышьяком и серой: купферникель NiAs , мышьяково-никелевый блеск NiAsS и др.

Свойства. Никель — белый твёрдый хорошо полирующийся металл, обладающий магнитными свойствами, устойчивый по отношению к воздуху и воде. Ni широко применяется для покрытия других металлов, а также в сплавах с железом, медью, цинком и другими металлами. Присадка никеля к стали придаёт ей большую же устойчивость и сопротивляемость коррозии. Напри-

мер, хромоникелевая сталь широко применяется для производства артиллерийских орудий, брони броневых снарядов, оболочек для пуль и т. п.

Сплавы никеля с медью, содержащие большой процент Ni, практически не подвергаются коррозии, применяются в химической промышленности, в самолётостроении, морском судостроении. Инвар — сталь, содержащая 36% Ni, обладает очень малым коэффициентом расширения и идёт на изготовление измерительных приборов. Платинит — сталь, содержащая 0,15% C и 46% Ni, имеет такой же коэффициент расширения, как стекло, и может впаиваться в стекло. Применяется для изготовления электрических ламп. Нихром — сплав Ni с хромом и никелин — сплав меди, никеля и цинка — обладают большим электрическим сопротивлением и применяются для изготовления реостатов и различных нагревательных электроприборов. С кислородом Ni образует два окисла: закись никеля NiO и окись никеля Ni_2O_3 . Соли никеля известны только с катионом двухвалентного Ni^{++} .

Сернокислый никель $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — изумрудно-зелёные кристаллы, растворимые в воде. Растворы этой соли служат для наполнения никелировочных ванн.

Окись никеля Ni_2O_3 — порошок; применяется при изготовлении щёлочных железо-никелевых аккумуляторов.

Рутений Ru_{44}^{102}

В природе рутений встречается вместе с платиной как небольшая примесь. Серебристо-белый твёрдый хрупкий и очень тугоплавкий металл, устойчивый по отношению к кислотам, при нагревании на воздухе окисляется, образуя сине-чёрную двуокись рутения RuO_2 . В своих соединениях большей частью четырёхвалентен. Четырёхокись рутения RuO_4 — жёлтые игольчатые кристаллы, при нагревании взрывают, образуя окись рутения и кислород.

Родий Rh_{45}^{103}

Встречается родий в платиновых рудах и в некоторых золотых как небольшая примесь.

Rh — белый ковкий металл, не растворимый в кислотах, в том числе и в «царской водке». С кислородом даёт два окисла: Rh_2O_3 (серо-чёрное вещество, не растворимое в кислотах, при нагревании выше 1100°C распадается на металл и кислород) и двуокись RhO_2 .

Палладий Pd_{46}^{107}

Палладий встречается в платиновых рудах как небольшая примесь. Он представляет собой серебристо-белый тугоплавкий металл, растворимый в «царской водке», азотной кислоте и горячей серной кислоте; на воздухе при нагревании не изменяется. Металлический палладий способен поглощать водород. 1 объём палладия при обык-

Свойства неорганических соединений

Таблица 3

| Название | Формула | Молекулярный вес | Уд. вес ¹ | Температура плавления °С | Температура кипения °С(760) | Внешний вид и свойства |
|------------------------------------|--|------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|---|
| Азот | N ₂ | 28,016 | Жидк. (-195,6°) 0,879 | -210,1 | -195,67 | Газ бесцветный, без запаха |
| —закись «веселящий газ» | N ₂ O | 44,02 | Жидк. (-89,4°) 1,226 | -90,7 | -88,7 | Газ бесцветный, ядовит |
| —окись | NO | 30,01 | Жидк. (-151,8°) 1,27 | -163,7 | -151,8 | То же |
| —двуокись | N ₂ O ₄ ⇌ 2NO ₂ | 92,02 | Жидк. (0°) 1,48 1,53 | -10 | 21,2 | Бурый газ, ядовит |
| Азотная кислота | HNO ₃ | 63,102 | 1,53 | -41,3 | 86(разл.) | Бесцветная жидкость, вызывает ожоги |
| Алюминий | Al | 26,97 | 2,70 | 658 | ~2000 | Серебристо-белый металл |
| —окись | Al ₂ O ₃ | 101,94 | 3,96 | 2050 | 2980 | Белый порошок |
| —хлористый | AlCl ₃ | 133,35 | 2,41 | 190 (2,5 см) | 183 | Бесцветный кристаллич., на воздухе дымит и расплывается |
| Аммиак | NH ₃ | 17,032 | Жидк. (0°) 0,638 | -77,7 | -33,4 | Бесцветный газ с характерным запахом; раздражает слизистую оболочку |
| Аммоний азотнокислый | NH ₄ NO ₃ | 80,05 | 1,73 | 165 | Разлаг. 200 | Бесцветные кристаллы |
| —углекислый средний | (NH ₄) ₂ CO ₃ · H ₂ O | 114,1 | — | — | Темпер. разл. 53 | Белые кристаллы, возгоняется |
| —хлористый | NH ₄ Cl | 53,50 | 1,53 | — | Темп. возгон. 335 | Бесцветные кристаллы, возгоняется |
| Аргон | Ar | 33,94 | Жидк. (-183°) 1,38 | -190 | -185,8 | Бесцветный газ, без запаха |
| Барий | Ba | 137,36 | 3,6 | 658 | 1537 | Серебристо-белый твердый |
| —едкий | Ba(OH) ₂ · 8H ₂ O | 315,5 | 1,66 | Непостоянные (безв. плав. не разлаг.) | — | Белый твердый, ядовит |
| —хлористый | BaCl ₂ · 2H ₂ O | 244,4 | 3,10 | (безводн.) 960 | — | Бесцветные кристаллы, ядовит |
| Бериллий | Be | 9,02 | 1,85 | 1280 | — | Серебристо-белый твердый |
| Бор | B | 10,82 | 1,73 | 2300 | — | Бурый аморфный |
| Борная кислота | H ₃ BO ₃ | 61,84 | 1,46 | Разл. при нагрев. -127 | — | Бесцветные кристаллы |
| Бор фтористый | BF ₃ | 67,82 | 2,31 | -127 | -101 | Бесцветный газ |
| Бром | Br ₂ | 159,832 | 3,14 | -7,3 | 58,7 | Темнобурная жидкость, вызывает ожоги |
| Ванадий | V | 50,95 | 5,7 | 1715 | — | Серебристо-белый твердый |
| Висмут | Bi | 209,0 | 9,80 | 271,0 | ~1500 | Красноватый твердый |
| Вода | H ₂ O | 18,016 | Тверд. (0°) 0,9168 (4°) 1,106 | 0 | 100 | Бесцветная жидкость |
| —«тяжелая» | D ₂ O | 20,017 | | 3,8 | 101,42 | Бесцветная жидкость, ядовита |
| Водород | H ₂ | 2,016 | Жидк. 0,070— (-252,81°) | -259,18 | -252,81 | Бесцветный газ, без запаха |
| —перекись | H ₂ O ₂ | 34,016 | Жидк. (0°) 1,465 19,1 | -0,89 | (47 мм) 80,2 | Бесцветная жидкость, вызывает ожоги |
| Вольфрам | W | 184,0 | 19,1 | 3370±50 | Рассчитано 4830 | Белый твердый |
| Гелий | He | 4,003 | Жидк. 0,122 | -272 | -268,8 | Бесцветный газ, без запаха |
| Железо | Fe | 55,84 | 7,86 | 1530 | 2450 | Серый твердый |
| —гидроксид | Fe(OH) ₃ | 106,86 | — | — | — | Красно-бурый твердый аморфный |
| —закись | FeO | 71,84 | 5,7 | 1377 | — | Черный твердый |
| —закись—окись (магнетит) | Fe ₃ O ₄ | 231,52 | 5,16 | 1527 | — | То же |
| —окись (гематит) | Fe ₂ O ₃ | 159,68 | 5,1—5,2 | 1565 | — | Красный аморфный |
| —хлористое | FeCl ₂ | 126,76 | 2,99 | — | — | Бесцветные кристаллы, расплавляются на воздухе |
| —хлорное | FeCl ₃ | 162,22 | 2,80 | 302 | — | Темнокоричневые кристаллы, расплавляются на воздухе |
| Золото | Au | 197,2 | 19,3 | 1063 | 2677 | Желтый твердый |
| Иод | I ₂ | 253,84 | 4,942 | 113,5 | 184,35 | Черные, блестящие кристаллы, возгоняются |

¹ Удельные веса жидкостей и твердых тел даны при температуре +20° С в г/см³, в отдельных случаях при другой температуре, указанной в скобках; удельные веса паров (газов) даны в кг/м³ при нормальных физических условиях (0° С, 760 мм рт. ст.).

Продолжение табл. 3

| Название | Формула | Молекулярный вес | Уд. вес | Температура плавления °C | Температура кипения °C(760) | Внешний вид и свойства |
|---|---|------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|---|
| Кадмий | Cd | 112,41 | 8,64 | 321 | 770 | Голубовато-белый твёрдый |
| Калий | K | 39,104 | 0,86 | 63,5 | 762,2 | Серебристо-белый, вспыхивает в воде |
| —азотистокислый | KNO ₂ | 85,11 | 1,92 | 297,5 | — | Бесцветные кристаллы |
| —азотнокислый | KNO ₃ | 101,11 | 2,10 | 336 | — | Бесцветные кристаллы |
| —едкий | KOH | 56,11 | 2,12 | (Безводный) 360,4 | 1324 | Белые кристаллы, вызывают ожоги |
| —хлористый (сильвин) | KCl | 74,56 | 1,989 | ~768 | 1415 | Бесцветные кристаллы |
| —хлорноватокислый | KClO ₃ | 122,56 | 2,344 | 370 | Разл. | То же |
| —цианистый | KCN | 65,11 | 1,56 | 623,5 | — | Бесцветные кристаллы, ядовит |
| Кальций | Ca | 40,07 | 1,55 | 851 | 1240 | Белый твёрдый |
| —едкий | Ca(OH) ₂ | 74,09 | 2,08 | Разлагается при нагревании | — | Белый аморфный |
| —окись | CaO | 56,07 | 3,2—3,4 | 2572 | — | Белый аморфный |
| —углеродистый (карбид) | CaC ₂ | 64,07 | 2,22 | 2300 | — | Белые кристаллы (техн. серый) |
| —хлористый | CaCl ₂ | 110,99 | 2,15 | 774 | — | Белые кристаллы, расплываются на воздухе |
| —хлорноватистокислый | Ca(OCl) ₂ · 3H ₂ O | 197,03 | — | — | — | Бесцветные кристаллы |
| —цианамид | CaCN ₂ | 80,09 | — | ~1190 | — | Серый порошок |
| Кислород | O ₂ | 32 | (183°)—1,20 | —218,8 | —183 | Бесцветный газ, без запаха |
| Кобальт | Co | 58,94 | 8,8 | 1490 | 30 мм: ~2375 | Серый твёрдый |
| Кремний | Si | 28,06 | 2,35 | ~1414 | 2400 | Серый кристаллический или коричневый аморфный |
| —карбид, карборунд | SiC | 40,06 | 3,12 | — | — | Бесцветные кристаллы |
| —окись (ангидрид кремневой кислоты) | SiO ₂ | 60,06 | 2,20 | — | 2590 | Бесцветный аморфный |
| —окись, кварц | SiO ₂ | 60,06 | 2,65 | 1470 | 2590 | Бесцветные кристаллы |
| —окись, кристобалит | SiO ₂ | 60,06 | 2,32 | 1710 | 57 | То же |
| —хлористый | SiCl ₄ | 169,90 | 1,48 | —68,7 | — | Бесцветная жидкость, на воздухе дымит |
| Литий | Li | 6,94 | 0,534 | 180 | 1336 | Серебристо-белый, вспыхивает в воде |
| —азотнокислый | LiNO ₃ | 68,95 | 2,366 | 249 | — | Бесцветные кристаллы |
| Магний | Mg | 24,32 | 1,74 | 650 | 1120 | Серебристо-белый твёрдый |
| —окись | MgO | 40,32 | 3,2—3,7 | <2500 | 2800 | Белый порошок |
| Марганец | Mn | 54,93 | 7,3 | 1191—1250 | 1900 | Серый твёрдый |
| —двуокись (перекись) (пиролюзит) | MnO ₂ | 86,93 | 5,03 | Диссоц. выше 530° | — | Коричневый порошок |
| Медь | Cu | 63,54 | 8,93 | 1083 | 2360 | Красноватый твёрдый |
| —азотнокислая, гидрат | Cu(NO ₃) ₂ · 3H ₂ O | 241,63 | 2,05 | — | — | Синие кристаллы |
| —сернокислая, гидрат | CuSO ₄ · 5H ₂ O | 249,72 | 2,29 | При 258° станов. безводн. | — | То же |
| Молибден | Mo | 96,0 | 10,2 | 2500 | ~3560 | Серебристо-белый твёрдый |
| Мышьяк | As | 74,96 | 5,72 | 817° (давл.) | т. возгон. 620 | Серый кристаллический |
| —мышьяковистый ангидрид | As ₂ O ₃ | 197,92 | 3,86—4,0; аморфн. 3—7 | Возгон. | — | Белый аморфный, ядовитый |
| —мышьяковый ангидрид | As ₂ O ₃ | 229,92 | 4,09 | Разлаг. | — | То же |
| Натрий | Na | 22,997 | 0,97 | 97,7 | 880 | Серебристо-белый, вспыхивает в воде |
| —бромистый | NaBr · 2H ₂ O | 133,95 | 2,18 Безводн. 3,2 | (Безводн.) 740 | 1395 | Бесцветные кристаллы |
| —едкий | NaOH | 40,01 | 2,02—1,83 | 318 | 1388 | Белый кристалл, вызывает ожоги |
| —кремнекислый | Na ₂ SiO ₃ | 122,06 | 2,4 | 1088 | — | Белый кристаллический или аморфный |
| —сернистый, норм. | Na ₂ S · 9H ₂ O | 240,21 | (Безводн) 1,86 | — | — | Бесцветные кристаллы |
| —углекислый (кислый), первичн. | NaHCO ₃ | 84,01 | 2,21 | Разл. при нагрев. | — | Белые кристаллы |
| —углекислый втор. гидрат (сода) | Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O | 286,16 | 1,5 | — | — | Бесцветные кристаллы |

Продолжение табл. 3

| Название | Формула | Молекулярный вес | Уд. вес | Температура плавления °C | Температура кипения °C (760) | Внешний вид и свойства |
|------------------------------------|---|------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------------------|---|
| Натрий—хлористый | NaCl | 58,46 | 2,17 | 800 | 1440 | Бесцветные кристаллы |
| Ниобий | Nb | 93,5 | 8,56 | 1950 | — | Серый твёрдый |
| Никель | Ni | 58,69 | 8,8 | 1455 | (30 мм) 2340 | Белый твёрдый |
| —азотнокислый гидрат | Ni(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O | 290,79 | 2,05 | (3H ₂ O)95 | — | Зелёные кристаллы |
| Олово | Sn | 118,70 | Бел. 7,29 Сер. 5,7 | 231,84 | 2275 | Серебряно-белые кристаллы |
| —хлористое гидрат (оловянная соль) | SnCl ₂ · 2H ₂ O | 225,64 | 2,70 | Безводн. 241 | Безводн. 603,25 | Белые кристаллы |
| —хлорное | SnCl ₄ | 260,54 | 2,28 | —33 | 113,9 | Бесцветная жидкость |
| Палладий | Pd | 106,7 | 11,5 | 1553 | — | Серебряно-белый твёрдый |
| Платина | Pt | 195,23 | 21,4 | 1771 | 3800 | То же |
| —хлорная | PtCl ₂ | 337,04 | (8H ₂ O) 2,43 | — | — | Красновато-коричневые кристаллы |
| Радий | Ra | 225,97 | — | 700 | — | Серебряно-белый твёрдый |
| Ртуть | Hg | 200,61 | 13,595 (0°) | —38,89 | 357 | Серебряно-белая жидкость |
| —окись | HgO | 216,6 | 11,2 | — | — | Красная или жёлтая |
| —сернистая (киноварь) | HgS | 232,67 | Кр. 8,09; Чёрн. 7,67 | Темп. возгон. 586 (давл.) 1450 | — | Красный кристаллический или чёрный аморфный |
| —одноклористая (каломель) | Hg ₂ Cl ₂ | 472,12 | 7,15 | 243 | 383,2 | Белый порошок |
| —двухлористая (сулема) | HgCl ₂ | 271,52 | 5,42 | 275 | 301 | Белые кристаллы |
| Свинец | Pb | 207,21 | 11,34 | 327 | 1540 | Голубовато-серый твёрдый |
| —азотнокислый | Pb(NO ₃) ₂ | 331,2 | 4,5 | Разл. начиная с 200° | — | Бесцветные кристаллы |
| —окись (свинцовый глёт) | PbO | 223,2 | Жёлт. 9,5 Кр. 9,3 | 880 | 1470 | Жёлтый или красный порошок |
| —окись (сурик) | Pb ₂ O ₃ | 685,6 | 9,07 | Дисс. при нагрев. | — | Красный порошок |
| —окись (ангидрид) | PbO ₂ | 239,2 | (крисст.) 9,5 | Дисс. при нагрев. | — | Бурый порошок |
| —сернистый | PbS | 239,3 | 7,1 (крисст. 7,5) | 1110 | — | Чёрные кристаллы |
| Сера ромбическая | S | 32,07 | 2,07 | 112,8 | — | Жёлтые кристаллы |
| —моноклиническая | S | 32,07 | 1,96 | 118,95 | 444,55 | Светложёлтые кристаллы |
| —аморфная | S | 32,07 | 1,92 | — | — | Светложёлтый аморфный |
| —диокись (сернистый ангидрид) | SO ₂ | 64,07 | Жидк. (—10°) 1,46 | —72,7 | —10,0 | Бесцветный газ с характерным запахом |
| —трёхокись (серный ангидрид) | SO ₃ | 80,07 | Жидк. 1,92 (β); (1,97) | (α) 16,8 | 44,6 | Белые кристаллы, на воздухе дымят и распыляются |
| —хлористая | S ₂ Cl ₂ | 135,06 | 1,63 | —80 | 133 | Тёмножёлтая жидкость с неприятным запахом |
| —серная кислота | H ₂ SO ₄ | 98,09 | Жидк. 1,85 | 10,49 | 338 (дисс.) | Бесцветная жидкость, вызывает ожоги |
| —хлорист. сульфурил | SO ₂ Cl ₂ | 134,99 | 1,67 | —54,1 | 69,1 | Бесцветная жидкость, дымит |
| —сернистый водород | H ₂ S | 34,09 | Жидк. (—60,2°) 0,96 | —83 | —60,2 | Бесцветный газ с неприятным запахом, ядовит |
| Серебро | Ag | 107,880 | 10,50 | 960,5 | ~2000 | Белый твёрдый |
| —азотнокислое | AgNO ₃ | 169,89 | 4,35 | 208,5 | — | Бесцветные кристаллы |
| Стронций | Sr | 87,63 | 2,60 | 797 | 1366 | Серебряно-белый |
| —азотнокислый | Sr(NO ₃) ₂ | 211,62 | 2,93 | 645 | — | Бесцветные кристаллы |
| —хлористый гидрат | SrCl ₂ · 6H ₂ O | 266,62 | 1,96 | (Безв.) 870 | — | То же |
| Сурьма | Sb | 121,76 | 6,69 | 630 | 1440 | Серебряно-белый твёрдый |
| —трёхсернистая | Sb ₂ S ₃ | 339,8 | 4,12 | 548 | Перег. без разл. | Оранжевый или красный аморфный порошок |
| —пятисернистая | Sb ₂ S ₅ | 404,0 | — | — | — | Оранжевый аморфный |
| Тантал | Ta | 181,5 | 16,6 | 3030 | — | Серый твёрдый |
| Титан | Ti | 47,90 | 4,50 | ~1800 | — | Серый твёрдый |
| —окись (рутил, анатас, брукит) | TiO ₂ | 79,9 | Рутил: 4,26, анатас: 3,84 | 1560 | — | Белый порошок |
| —четырёххлористый | TiCl ₄ | 189,94 | 1,76 | —23 | 136,5 | Бесцветная жидкость, дымит |
| Торий | Th | 232,12 | 11,5 | 1842 | — | Тёмносерый твёрдый |
| —азотнокислый гидрат | Th(NO ₃) ₄ · 4H ₂ O | 552,20 | — | — | — | Бесцветные кристаллы |

Продолжение табл. 3

| Название | Формула | Молекулярный вес | Уд. вес | Температура плавления °C | Температура кипения °C(760) | Внешний вид и свойства |
|--|--|------------------|---|--------------------------|-----------------------------|---|
| —окись | ThO ₂ | 264,1 | 9,87 | 3050 | — | Белый порошок |
| Углерод | C | 12 | 3,51 (алмаз) 2,17—2,3 (графит) | — | — | Бесцветный кристаллический, серый кристаллический |
| —окись | CO | 28 | Жидк. (—190°) 0,7923 | (100 мм) —207 | —190 | Бесцветный газ, без запаха, ядовит |
| —двуокись—угольный ангидрид | CO ₂ | 44 | Твёрдый (—79°) 1,53 | (5,1 ат) —57 | Темп. возгон. —73,5 | Бесцветный газ |
| —сернистый сероуглерод | CS ₂ | 76,14 | (0°) 1,114 | —107 | 7 | Бесцветная жидкость, легко воспламеняется |
| —четырёххлористый | CCl ₄ | 153,84 | (0°) 1,632 | —23,77 | 76,6 | Бесцветная жидкость |
| —хлорокись, хлористый карбонил, фосген | COCl ₂ | 98,92 | (0°) 1,436 | —126 | 8,2 | Бесцветный газ, ядовит |
| Уран | U | 238,14 | 18,7 | ~1690 | — | Серебристо-белый твёрдый |
| —двуокись | UO ₂ | 270,2 | 10,75 | 2176 | — | Тёмнокоричневый или красный твёрдый |
| —трёхокись (урановый ангидрид) . . | UO ₃ | 286,2 | 6,0 | — | — | Жёлто-коричневый или красный твёрдый |
| —закись—окись . . | U ₂ O ₈ | 842,6 | 8,2 | — | — | Зелёный или чёрный твёрдый |
| —шестифтористый . . | UF ₆ | 352,2 | 4,63 | 69,5 | Возгон. 56 | Светложёлтый кристаллич. |
| Фосфор | P | 31,02 | 1,83 | 44 | 280,5 | Белые кристаллы, ядовит |
| —красный | P | 31,02 | 2,20 | — | — | Красные кристаллы |
| Кислота фосфористая | H ₃ PO ₃ | 82,06 | 1,65 | 73,6 | — | Бесцветные кристаллы |
| —фосфорноватистая | H ₃ PO ₂ | 66,06 | 1,49 | 17,4 | Разл. при нагрев. | То же |
| —метафосфорная . . | (HPO ₃) _x | 80,05x | — | — | — | Бесцветный аморфный |
| —ортофосфорная . . | H ₃ PO ₄ | 98,06 | 1,88 | Бел. 41,75 Бесцв. 37 | — | Белые кристаллы |
| —пирофосфорная . . | H ₄ P ₂ O ₇ | 178,11 | — | (Крист.) 61 | — | Бесцветный стекловидный или кристаллический |
| —пятиокись (фосфорный ангидрид) . . | P ₂ O ₅ | 142,08 | 2,39 | 563 | — | Белый порошок, на воздухе расплывается |
| —фосфористый водород (фосфин) . . . | PH ₃ | 34,06 | Жидкий —88° 0,74 | —133 | —87,4 | Бесцветный газ, ядовит |
| Фтор | F ₂ | 38 | Жидкий (—188°) 1,11 | —223 | —188 | Жёлто-зелёный газ, ядовит |
| Фтористый водород | HF | 20,01 | Жидкий (19°) 0,987 | —92,3 | 19,5 | Бесцветная жидкость, вызывает ожог |
| Хлор | Cl ₂ | 70,914 | Жидкий 1,57 | —100,5 | —33,9 | Жёлто-зелёный газ, ядовит |
| Хлористый водород | HCl | 36,47 | Жидкий (—85°) 1,185 | —114 | —85 | Бесцветный газ, раздражает слизистую оболочку |
| Хром | Cr | 52,01 | 7,1 | 1765 | ~2200 | Белый твёрдый |
| —квасцы | KCr(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O | 499,4 | 1,84 | 89 | — | Фиолетовые кристаллы |
| —окись | Cr ₂ O ₃ | 152,0 | 5,21 | 2140 | — | Зелёный порошок |
| Цианистый водород (синильная кислота) | HCN | 27,01 | Жидкий 0,691 | —13 | 26,5 | Бесцветная жидкость, ядовита |
| Цинк | Zn | 65,38 | 7,14 | 419,44 | 907 | Голубовато-белые кристаллы |
| —окись | ZnO | 81,38 | аморфный 5,42 | — | Темп. возгон. 1800 | Белый порошок |
| —хлористый | ZnCl ₂ | 136,29 | Кр. 5,78 2,92 | 365 | 730 | Белые кристаллы |

новенной температуре поглощает больше 300 объёмов водорода.

Для Pd наиболее характерны соединения, в которых он двухвалентен. Соли, содержащие катион Pd²⁺, коричневого цвета, легко растворимы в воде, расплываются на воздухе. Палладий образует различные комплексные соединения.

Осмий Os¹⁹⁰₇₆

Осмий содержится в платиновых рудах в виде не растворимого в «царской водке» сплава с иридием—осмиридия.

Os — синевато-серый металл, очень твёрдый, хрупкий, очень тугоплавкий. При нагревании на воздухе легко окисляется, образуя OsO₄—бледножёлтое летучее вещество с характерным запахом, которое легко восстанавливается в OsO₂—чёрный порошок.

Os при нагревании реагирует с галогенами, давая смесь галлоидопродуктов, в которых Os бывает двух-, трёх- и четырёхвалентен. Металлический Os находит применение как катализатор.

Иридий Ir_{77}^{193}

Иридий встречается вместе с платиной и осмием. Небольшие количества иридия встречаются вместе с золотом. Иридий — серебристо-белый, очень твёрдый, хрупкий, тугоплавкий металл. Он не растворяется в «царской водке» и кислотах. На воздухе тонкий порошок иридия при температуре красного каления окисляется до IrO_3 , которая при более высокой температуре вновь разлагается с выделением металла. Иридий образует многочисленные комплексные соединения. Сплавы иридия с платиной твёрды и очень устойчивы к химическим воздействиям. Из сплава, содержащего 90% Pt и 10% Ir, изготовлены международные эталонные метра и килограмма. Этот сплав применяется также при изготовлении свечей для автомобильных моторов.

Платина Pt_{78}^{195}

В природе платина встречается в самородном состоянии в виде крупинок, содержащих небольшие примеси рутения, родия, палладия, осмия и иридия.

Свойства. Платина — белый блестящий ковкий тяжёлый металл, в химическом отношении очень инертный. Даже при очень сильном нагревании на воздухе платина не изменяется. Кислоты не действуют на платину. Её можно растворить только в «царской водке» (смесь 3 ч. соляной и 1 ч. азотной кислот). При этом образуется комплексное соединение $\text{H}_2[\text{PtCl}_6]$ — платинохлористоводородная кислота, которая может быть выделена из раствора в виде кристаллов $\text{H}_2[\text{PtCl}_6] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ коричневатого-красного цвета. Платинохлористоводородная кислота является обычным продажным препаратом. Платина образует большое число комплексных соединений. Применяется как катализатор, а также для изготовления многих приборов (термопар, электродов и т. д.). В химических лабораториях употребляют платиновую посуду: тигли, чашки и т. п.

Таблица 4

Удельный вес воды при разных температурах
в г/см^3

| $t^\circ \text{C}$ | d | $t^\circ \text{C}$ | d | $t^\circ \text{C}$ | d | $t^\circ \text{C}$ | d |
|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|
| 0 | 0,99987 | 14 | 0,99927 | 27 | 0,99654 | 40 | 0,99224 |
| 1 | 0,99993 | 15 | 0,99913 | 28 | 0,99626 | 45 | 0,99024 |
| 2 | 0,99997 | 16 | 0,99897 | 29 | 0,99597 | 50 | 0,98807 |
| 3 | 0,99999 | 17 | 0,99880 | 30 | 0,99567 | 55 | 0,98573 |
| 4 | 1,00000 | 18 | 0,99862 | 31 | 0,99537 | 60 | 0,98324 |
| 5 | 0,99999 | 19 | 0,99843 | 32 | 0,99505 | 65 | 0,98059 |
| 6 | 0,99997 | 20 | 0,99823 | 33 | 0,99473 | 70 | 0,97781 |
| 7 | 0,99993 | 21 | 0,99802 | 34 | 0,99440 | 75 | 0,97489 |
| 8 | 0,99988 | 22 | 0,99780 | 35 | 0,99406 | 80 | 0,97183 |
| 9 | 0,99981 | 23 | 0,99756 | 36 | 0,99371 | 85 | 0,96865 |
| 10 | 0,99973 | 24 | 0,99732 | 37 | 0,99336 | 90 | 0,96534 |
| 11 | 0,99963 | 25 | 0,99707 | 38 | 0,99299 | 95 | 0,96192 |
| 12 | 0,99952 | 26 | 0,99681 | 39 | 0,99262 | 100 | 0,95838 |
| 13 | 0,99940 | | | | | | |

Таблица 5

Удельные веса водных растворов соляной (HCl), азотной (HNO_3), серной (H_2SO_4) и уксусной (CH_3COOH) кислот при 20°C в зависимости от концентрации (в весовых процентах) в г/см^3

| % | HCl d | HNO_3 d | H_2SO_4 d | CH_3COOH d |
|----|---------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 1,0032 | 1,00364 | 1,0051 | 0,9986 |
| 2 | 1,0082 | 1,00909 | 1,0118 | 1,0012 |
| 3 | | 1,01457 | 1,0184 | 1,0025 |
| 4 | 1,0181 | 1,02008 | 1,0250 | 1,0040 |
| 5 | | 1,02563 | 1,0317 | 1,0055 |
| 6 | 1,0279 | 1,03122 | 1,0385 | 1,0069 |
| 7 | | 1,0369 | 1,0453 | 1,0083 |
| 8 | 1,0376 | 1,0427 | 1,0522 | 1,0097 |
| 9 | | 1,0485 | 1,0591 | 1,0111 |
| 10 | 1,0474 | 1,0543 | 1,0661 | 1,0125 |
| 11 | | 1,0602 | 1,0731 | 1,0139 |
| 12 | 1,0574 | 1,0661 | 1,0802 | 1,0154 |
| 13 | | 1,0721 | 1,0874 | 1,0168 |
| 14 | 1,0675 | 1,0781 | 1,0947 | 1,0182 |
| 15 | | 1,0842 | 1,1020 | 1,0195 |
| 16 | 1,0776 | 1,0903 | 1,1094 | 1,0209 |
| 17 | | 1,0964 | 1,1168 | 1,0223 |
| 18 | 1,0878 | 1,1026 | 1,1243 | 1,0236 |
| 19 | | 1,1088 | 1,1318 | 1,0250 |
| 20 | 1,0980 | 1,1150 | 1,1394 | 1,0263 |
| 21 | | 1,1213 | 1,1471 | 1,0276 |
| 22 | 1,1083 | 1,1276 | 1,1548 | 1,0288 |
| 23 | | 1,1340 | 1,1626 | 1,0301 |
| 24 | 1,1187 | 1,1404 | 1,1704 | 1,0313 |
| 25 | | 1,1469 | 1,1783 | 1,0326 |
| 26 | 1,1290 | 1,1534 | 1,1862 | 1,0338 |
| 27 | | 1,1600 | 1,1942 | 1,0349 |
| 28 | 1,1392 | 1,1666 | 1,2023 | 1,0361 |
| 29 | | 1,1733 | 1,2104 | 1,0372 |
| 30 | 1,1493 | 1,1800 | 1,2185 | 1,0384 |
| 31 | | 1,1867 | 1,2267 | 1,0395 |
| 32 | 1,1593 | 1,1934 | 1,2349 | 1,0406 |
| 33 | | 1,2002 | 1,2432 | 1,0417 |
| 34 | 1,1691 | 1,2071 | 1,2515 | 1,0428 |
| 35 | | 1,2140 | 1,2599 | 1,0438 |
| 36 | 1,1789 | 1,2205 | 1,2684 | 1,0449 |
| 37 | | 1,2270 | 1,2769 | 1,0459 |
| 38 | 1,1885 | 1,2335 | 1,2855 | 1,0469 |
| 39 | | 1,2399 | 1,2941 | 1,0479 |
| 40 | 1,1980 | 1,2463 | 1,3028 | 0,0488 |
| 41 | | 1,2527 | 1,3116 | 1,0498 |
| 42 | | 1,2591 | 1,3205 | 1,0507 |
| 43 | | 1,2655 | 1,3294 | 1,0516 |
| 44 | | 1,2719 | 1,3384 | 1,0525 |
| 45 | | 1,2783 | 1,3476 | 1,0534 |
| 46 | | 1,2847 | 1,3569 | 1,0542 |
| 47 | | 1,2911 | 1,3663 | 1,0551 |
| 48 | | 1,2975 | 1,3758 | 1,0559 |
| 49 | | 1,3040 | 1,3854 | 1,0567 |
| 50 | | 1,3100 | 1,3951 | 1,0575 |
| 51 | | 1,3160 | 1,4049 | 1,0582 |
| 52 | | 1,3219 | 1,4148 | 1,0590 |
| 53 | | 1,3278 | 1,4248 | 1,0597 |
| 54 | | 1,3336 | 1,4350 | 1,0604 |
| 55 | | 1,3393 | 1,4453 | 1,0611 |
| 56 | | 1,3449 | 1,4557 | 1,0618 |
| 57 | | 1,3505 | 1,4662 | 1,0624 |
| 58 | | 1,3560 | 1,4768 | 1,0631 |
| 59 | | 1,3614 | 1,4875 | 1,0637 |
| 60 | | 1,3667 | 1,4983 | 1,0642 |
| 61 | | 1,3719 | 1,5091 | 1,0648 |
| 62 | | 1,3769 | 1,5200 | 1,0653 |
| 63 | | 1,3818 | 1,5310 | 1,0658 |
| 64 | | 1,3866 | 1,5421 | 1,0662 |
| 65 | | 1,3913 | 1,5533 | 1,0666 |
| 66 | | 1,3959 | 1,5646 | 1,0671 |
| 67 | | 1,4004 | 1,5760 | 1,0675 |
| 68 | | 1,4048 | 1,5874 | 1,0678 |
| 69 | | 1,4091 | 1,5989 | 1,0682 |
| 70 | | 1,4134 | 1,6105 | 1,0685 |
| 71 | | 1,4176 | 1,6221 | 1,0687 |
| 72 | | 1,4218 | 1,6338 | 1,0690 |
| 73 | | 1,4258 | 1,6456 | 1,0693 |

Продолжение табл. 5

| % | HCl <i>d</i> | HNO ₃ <i>d</i> | H ₂ SO ₄ <i>d</i> | CH ₃ COOH <i>d</i> |
|-----|-----------------|------------------------------|--|----------------------------------|
| 74 | | 1,4298 | 1,6574 | 1,0694 |
| 75 | | 1,4337 | 1,6692 | 1,0686 |
| 76 | | 1,4375 | 1,6810 | 1,0698 |
| 77 | | 1,4413 | 1,6927 | 1,0699 |
| 78 | | 1,4450 | 1,7043 | 1,0700 |
| 79 | | 1,4486 | 1,7158 | 1,0700 |
| 80 | | 1,4521 | 1,7272 | 1,0700 |
| 81 | | 1,4555 | 1,7383 | 1,0699 |
| 82 | | 1,4589 | 1,7491 | 1,0698 |
| 83 | | 1,4622 | 1,7594 | 1,0696 |
| 84 | | 1,4655 | 1,7693 | 1,0693 |
| 85 | | 1,4686 | 1,7786 | 1,0689 |
| 86 | | 1,4716 | 1,7872 | 1,0685 |
| 87 | | 1,4745 | 1,7951 | 1,0680 |
| 88 | | 1,4773 | 1,8022 | 1,0675 |
| 89 | | 1,4800 | 1,8087 | 1,0668 |
| 90 | | 1,4826 | 1,8144 | 1,0661 |
| 91 | | 1,4850 | 1,8195 | 1,0652 |
| 92 | | 1,4873 | 1,8240 | 1,0643 |
| 93 | | 1,4892 | 1,8279 | 1,0632 |
| 94 | | 1,4912 | 1,8312 | 1,0619 |
| 95 | | 1,4932 | 1,8337 | 1,0605 |
| 96 | | 1,4952 | 1,8355 | 1,0588 |
| 97 | | 1,4974 | 1,8364 | 1,0570 |
| 98 | | 1,5008 | 1,8361 | 1,0549 |
| 99 | | 1,5056 | 1,8342 | 1,0524 |
| 100 | | 1,5129 | 1,8305 | 1,0498 |

Таблица 6

Удельные веса водных растворов щелочей едкого кали (KOH), едкого натра (NaOH) и аммиака (NH₃) в зависимости от концентрации (в весовых процентах) в г/см³

| % | KOH <i>d</i> | NaOH <i>d</i> | NH ₃ <i>d</i> | % | KOH <i>d</i> | NaOH <i>d</i> | NH ₃ <i>d</i> |
|----|-----------------|------------------|-----------------------------|----|-----------------|------------------|-----------------------------|
| 0 | 0,9991 | 0,9991 | | 26 | 1,2489 | 1,2879 | 0,9069 |
| 1 | 1,0083 | 1,0106 | 0,9948 | 27 | 1,2532 | 1,2988 | |
| 2 | 1,0175 | 1,0219 | 0,9905 | 28 | 1,2696 | 1,3096 | 0,9010 |
| 3 | 1,0267 | 1,0332 | | 29 | 1,2800 | 1,3204 | |
| 4 | 1,0359 | 1,0444 | 0,9822 | 30 | 1,2905 | 1,3311 | 0,8951 |
| 5 | 1,0452 | 1,0555 | | 31 | 1,3011 | 1,3417 | |
| 6 | 1,0544 | 1,0666 | 0,9742 | 32 | 1,3117 | 1,3522 | 0,8892 |
| 7 | 1,0637 | 1,0777 | | 33 | 1,3224 | 1,3627 | |
| 8 | 1,0730 | 1,0889 | 0,9665 | 34 | 1,3331 | 1,3732 | 0,8832 |
| 9 | 1,0824 | 1,1000 | | 35 | 1,3440 | 1,3835 | |
| 10 | 1,0918 | 1,1111 | 0,9591 | 36 | 1,3549 | 1,3937 | 0,8772 |
| 11 | 1,1013 | 1,1222 | | 37 | 1,3659 | 1,4039 | |
| 12 | 1,1108 | 1,1333 | 0,9519 | 38 | 1,3769 | 1,4140 | 0,8712 |
| 13 | 1,1203 | 1,1444 | | 39 | 1,3879 | 1,4240 | |
| 14 | 1,1299 | 1,1555 | 0,9450 | 40 | 1,3991 | 1,4339 | 0,8651 |
| 15 | 1,1396 | 1,1665 | | 41 | 1,4103 | 1,4437 | |
| 16 | 1,1483 | 1,1776 | 0,9383 | 42 | 1,4215 | 1,4534 | |
| 17 | 1,1580 | 1,1887 | | 43 | 1,4329 | 1,4630 | |
| 18 | 1,1688 | 1,1998 | 0,9317 | 44 | 1,4443 | 1,4726 | |
| 19 | 1,1786 | 1,2108 | | 45 | 1,4558 | 1,4822 | |
| 20 | 1,1884 | 1,2219 | 0,9253 | 46 | 1,4673 | 1,4918 | |
| 21 | 1,1984 | 1,2330 | | 47 | 1,4790 | 1,5013 | |
| 22 | 1,2083 | 1,2440 | 0,9190 | 48 | 1,4907 | 1,5108 | |
| 23 | 1,2184 | 1,2550 | | 49 | 1,5025 | 1,5203 | |
| 24 | 1,2285 | 1,2660 | 0,9129 | 50 | 1,5143 | 1,5297 | |
| 25 | 1,2387 | 1,2770 | | | | | |

ОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Номенклатура органических соединений

Научная номенклатура органических соединений разработана Женевским конгрессом в 1892 г. (преимущественно для

соединений с открытой цепью) и Римским съездом химиков в 1938 г. (для циклических соединений). В табл. 7 приводится краткая сводка названий групп углеводородов по женевской номенклатуре:

Названия групп и формулы углеводородов

Таблица 7

| Определение группы | Общая формула | Название группы по женевской номенклатуре | Окончание наименований соединений данной группы | Примеры |
|--|----------------|---|--|---|
| Насыщенные углеводороды открытого строения, или парафины | $C_n H_{2n+2}$ | Алканы | ан | Метан CH_4 |
| Ненасыщенные углеводороды открытого строения с одной двойной связью, или олефины | $C_n H_{2n}$ | Алкены | ен После окончания ставится цифра, указывающая номер углеродного атома, при котором расположена двойная связь | Бутен-2 $CH_3-CH=CH-CH_3$ |
| Ненасыщенные углеводороды открытого строения с двумя двойными связями, или диолефины | $C_n H_{2n-2}$ | Алкадиены | диен то же | Бутадиен $CH_2=CH-CH=CH_2$ |
| Ненасыщенные углеводороды с одной тройной связью, или ацетиленовые углеводороды | $C_n H_{2n-2}$ | Алкины | ин то же | Этин $CH \equiv CH$ |
| Насыщенные монотрициклические углеводороды, или нафены | $C_n H_{2n}$ | Цикланы | ан | Циклогексан CH_2 $\begin{array}{cc} CH_2 & CH_2 \\ & \\ CH_2 & CH_2 \\ & \\ CH_2 & \end{array}$ |

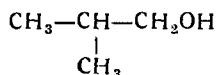
Наименования остальных органических соединений производятся от соответствующих углеводородов прибавлением характерного окончания:

| Определение соединения | Окончание названия | Примеры |
|------------------------|--------------------|---|
| Спирты | ол | Метанол CH_3OH |
| Альдегиды | аль | Этаналь CH_3CHO |
| Кетоны | он | Пропанон $\text{CH}_3\text{CO}\cdot\text{CH}_3$ |
| Кислоты . . . | овая к-та | Этановая кислота CH_3COOH |

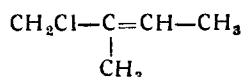
или прибавлением к названию углеводорода наименования атома или группы атомов с цифрой, указывающей номер углеродного атома цепи, к которому присоединена группа:

| Определение соединения | Примеры |
|---|---|
| Галоидпроизводные углеводородов | 2-хлорпропан $\text{CH}_3\text{—CHCl—CH}_3$ |
| Нитропроизводные углеводородов | Нитрометан $\text{CH}_3\text{—NO}_2$ |

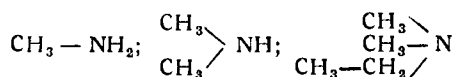
Наименования соединений с разветвлённой цепью по женеvской номенклатуре производятся от самой длинной цепи, включающей кратные связи и неуглеродные группы. Наименования и местоположения боковых цепей располагаются перед названием соединения, отвечающего самой длинной цепи, например 2—метилпропанол



или 1—хлор, 2—метилбутен—2



Наряду с женеvской номенклатурой до сих пор ещё широко применяется рациональная номенклатура, а также тривиальные названия органических соединений, так как для некоторых классов соединений научная номенклатура ещё недостаточно разработана. В рациональной номенклатуре в основу кладётся название группы атомов, характерной для данного ряда соединений, и перед ним помещаются наименования радикалов, соединённых с этой группой, например названия аминов производятся прибавлением названий радикалов к слову амин



Метиламин. Диметиламин. Диметилэтиламин.

Углеводороды

Углеводородами называются соединения, состоящие только из углерода и водорода.

Алканы, или парафины

Гомологический ряд алканов. Алканами, или парафинами, называются углеводороды состава, выражаемого общей формулой $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ (n —целые числа, начиная с 1). Алканы (табл. 8) являются предельными углеводородами, так как углеводородов с большим отношением водорода к углероду нет.

Таблица 8

Названия и формулы первых представителей ряда алканов

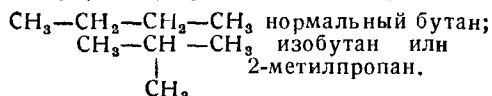
| n | Название алкана | Формула | Структурная формула |
|---|-----------------|---------------------------|---|
| 1 | Метан . . | CH_4 | $\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H—C—H} \\ \\ \text{H} \end{array}$ |
| 2 | Этан . . . | C_2H_6 | $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H—C—C—H} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ |
| 3 | Пропан . | C_3H_8 | $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \\ \text{H—C—C—C—H} \\ \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ |
| 4 | Бутан . . | C_4H_{10} | $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H—C—C—C—C—H} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ |
| 5 | Пентан . . | C_5H_{12} | $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{H—C—C—C—C—C—H} \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ |

Название последующих, как и пятого, производятся от греческих названий цифр.

Гомологическая разность ряда алканов— CH_2 —называется метиленом.

Изомерия алканов. Начиная с C_4H_{10} —бутана, каждая суммарная формула охватывает несколько углеводородов, отличающихся структурой. Углеводороды с неразветвлённой цепью называют нормальными, углеводороды с разветвлённой цепью—изоуглеводородами.

Формуле C_4H_{10} отвечают два бутана:



Формуле C_5H_{12} отвечают три пентана: нормальный пентан и два изопентана (2-метилбутан и 2, 2-диметилпропан).

Число изомеров очень быстро возрастает с увеличением числа углеродных атомов в алкане. Формуле $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ отвечает уже 1855 изомеров тетрадекана.

Изомеры отличаются по физическим и химическим свойствам.

Физические свойства алканов. В ряду нормальных алканов с увеличением молекулярного веса температуры кипения и плавления равномерно увеличиваются и удельные веса (в нормальных физических

условиях) возрастают, не превышая $0,9 \text{ г/см}^3$ для самых тяжёлых. Температуры кипения изопарафинов несколько меньше соответствующих нормальных парафинов, а температуры плавления выше и тем выше, чем более разветвлена цепь. При комнатной температуре и атмосферном давлении метан, этан, пропан, н-бутан и изобутан — газы. Все нормальные алканы от пентана до гексдекана — жидкости; остальные — твёрдые тела. Газообразные алканы плохо растворимы в воде, твёрдые совершенно нерастворимы. Все алканы хорошо растворимы в различных органических растворителях (бензол, эфир и др.).

Химические свойства алканов. Алканы в отсутствие катализаторов отличаются пониженной способностью к реакциям. Высокие температуры вызывают различные реакции разложения и изомеризации, широко используемые в нефтеперерабатывающей промышленности для производства бензина (термический крекинг) и сажи.

Сильные окислители и кислород при низких температурах не действуют на алканы. На этом основана защита металлов от коррозии при помощи смазки. При повышенных температурах они окисляют алканы до органических кислот. При высоких температурах кислород окисляет алканы до CO_2 и H_2O (горение). Смеси кислорода с газообразными алканами в определённых пределах взрываются при поджигании.

Галоиды (в особенности хлор) на свету и при повышенных температурах медленно галоидируют алканы с образованием галоидопроизводных $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{X}$, $\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{X}_2$ и др. (X — галоид).

Крепкая серная кислота не действует на алканы. Дымящая серная кислота при слабом нагревании сульфuriрует алканы с образованием сульфокислот— $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{SO}_3\text{H}$.

Разбавленная азотная кислота при нагревании под повышенным давлением нитрует алканы с образованием нитросоединений $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{NO}_2$.

Метан CH_4 — газ без цвета и запаха, плохо растворимый в воде и хорошо в органических растворителях. Горит почти несветящимся голубоватым пламенем. $t_{\text{кип}} = -161,5^\circ\text{C}$, $t_{\text{пл}} = -184^\circ\text{C}$; $d = 0,415 \text{ г/см}^3$ при -165°C . Критическая температура метана -11°C ; критическое давление 180 ат . Метан входит главной составной частью в нефтяные газы, рудничный газ и болотный газ; он также содержится в светильном газе.

Этан C_2H_6 — газ без цвета и запаха, плохо растворим в воде и хорошо в органических растворителях. $t_{\text{кип}} = -93^\circ\text{C}$, $t_{\text{пл}} = -172^\circ\text{C}$; $d = 0,446 \text{ г/см}^3$ при 0°C и $23,8 \text{ ат}$. Критическая температура этана $+4^\circ\text{C}$; критическое давление 46 ат . Этан содержится в нефтяных газах и в светильном газе, получаемом при сухой перегонке каменного угля.

н-гептан C_7H_{16} — бесцветная легколетучая жидкость, не растворимая в воде и хорошо растворимая в органических растворителях. $t_{\text{кип}} = 98^\circ\text{C}$; $t_{\text{пл}} = -97^\circ\text{C}$; $d = 0,730 \text{ г/см}^3$. Наряду с изооктаном гептан избран для нормировки октановой шкалы антидетонационных свойств бензинов. Окта-

новое число чистого гептана принято равным нулю.

Изооктан C_8H_{18} 2,2-диметил-4-метилпентан — бесцветная жидкость. Наряду с н-гептаном избран для нормировки октановой антидетонационной шкалы. Октановое число изооктана принято равным 100.

Триптан C_7H_{16} 2,2-диметил-3-метилбутан — бесцветная жидкость. Обладает высокими антидетонационными свойствами; в Америке положен в основу новой — триптановой — антидетонационной шкалы.

Цикланы, или нафтенy

Гомологический ряд цикланов. Цикланами, или нафтенами, называются углеводороды циклического строения и состава, выражаемого общей формулой C_nH_{2n} , начиная с $n = 3$.

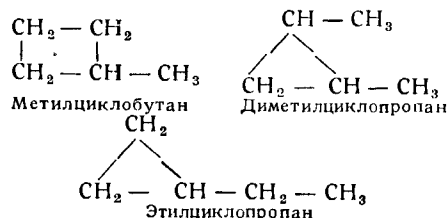
Таблица 9
Названия и формулы первых представителей ряда цикланов

| n | Название циклана | Формула | Структурная формула |
|---|---------------------|---------------------------|---------------------|
| 3 | Циклопропан | C_3H_6 | |
| 4 | Циклбутан | C_4H_8 | |
| 5 | Циклопентан | C_5H_{10} | |
| 6 | Циклогексан | C_6H_{12} | |

Замещением водорода в кольце циклана на углеводородные радикалы образуется гомологический ряд данного циклана. Например, $\text{C}_6\text{H}_{11}-\text{CH}_3$ — метилциклогексан, $\text{C}_6\text{H}_{11}-\text{C}_2\text{H}_5$ — этилциклогексан и др. являются гомологами циклогексана.

Циклогексан и его гомологи называются гидроароматическими, так как могут быть получены гидрированием (присоединением водорода) ароматических углеводородов.

Изомерия цикланов. Каждый из основных цикланов имеет изомеры (углеводороды с одинаковой формулой, но различного строения), являющиеся одновременно гомологами предыдущих цикланов. Например, изомерами циклопентана являются гомологи циклобутана и циклопропана:



У цикланов наблюдаются также оптическая и цистрансизомерия.

Физические свойства цикланов. По физическим свойствам цикланы похожи на алканы. При комнатной температуре и атмосферном давлении циклопропан и циклобутан — газы, а остальные цикланы — бесцветные жидкости с удельным весом меньше единицы, не растворимые в воде, но хорошо растворимые в органических растворителях.

Химические свойства цикланов, за исключением циклопропана и циклобутана, сходны с химическими свойствами алканов. В отличие от алканов цикланы окисляются с образованием двухосновных кислот, подтверждающих циклическую структуру нафтенов. Циклопропан и циклобутан более способны к реакциям, легко галоидируются и присоединяют галоидоводородные кислоты с разрывом кольца; при высокой температуре изомеризуются в алкены. Циклогексан и его гомологи при высокой температуре и в присутствии мелкодробного палладия или никеля (катализаторы) легко дегидрируются (отдают водород) с образованием ароматических углеводородов.

Циклопентан C_5H_{10} — бесцветная легколетучая жидкость. $t_{кип} = 51^\circ C$, $t_{пл} = -80^\circ C$; $d_4^{20} = 0,754 \text{ г/см}^3$. Содержится в значительных количествах в нефтях СССР, в особенности в бакинской.

Циклогексан C_6H_{12} — бесцветная легколетучая жидкость. $t_{кип} = 81^\circ C$, $t_{пл} = 8^\circ C$; $d_4^{20} = 0,778 \text{ г/см}^3$. Содержится в значительных количествах в нефтях СССР, в особенности в бакинской.

Алкены, или олефины

Гомологический ряд алкенов. Алкенами, или олефинами, называются ациклические углеводороды состава, выражаемого общей формулой C_nH_{2n} (начиная с $n=2$) и имеющие одну двойную связь между двумя соседними углеродными атомами.

Таблица 10

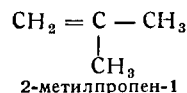
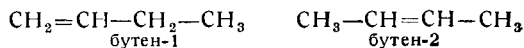
Названия и формулы первых представителей ряда алкенов

| n | Название алкена | Формула | Структурная формула |
|---|--------------------------------|----------|--|
| 2 | Этилен, или этен | C_2H_4 | $\begin{array}{c} H & & H \\ & \diagdown & / \\ & C = C & \\ & / & \diagdown \\ H & & H \end{array}$ |
| 3 | Пропилен, или пропен | C_3H_6 | $\begin{array}{c} H & & H & & H \\ & \diagdown & / & & \\ & C = C & - & C & - & H \\ & / & & & \\ H & & & H & \end{array}$ |
| 4 | Бутилен, или бутен | C_4H_8 | $\begin{array}{c} H & & H & & H & & H \\ & \diagdown & / & & & & \\ & C = C & - & C & - & C & - & H \\ & / & & & & & \\ H & & & H & & H & \end{array}$ |

Алкены являются непредельными соединениями.

Изомерия алкенов вызывается как различным положением двойной связи, так и

различной структурой углеродного скелета. Например, существует три бутена:



Цифра в конце названия указывает положение двойной связи. Алкены, или олефины, являются изомерами цикланов.

Физические свойства алкенов. По физическим свойствам алкены сходны с алканами и цикланами. При комнатной температуре и атмосферном давлении этен, пропен и бутен — газы. Следующие за ними алкены — жидкости и высшие — твердые кристаллические тела. Удельные веса алкенов меньше единицы, но выше соответствующих алканов. Алкены не растворимы в воде и хорошо растворимы в органических растворителях. Теплоты образования алкенов меньше соответствующих алканов.

Химические свойства алкенов. Алкены, или олефины, очень реакционноспособны. Реакционная способность их обусловлена наличием двойной связи. Поэтому для алкенов характерны реакции присоединения: галоидов (при обыкновенной температуре), водорода (при повышенной температуре и в присутствии катализаторов — мелкодробленного никеля, меди и др.), кислот, воды (в присутствии катализатора) и др. Алкены легко окисляются с разрывом цепи по месту двойной связи и образованием различных продуктов окисления. Под действием серной кислоты и других веществ алкены легко полимеризуются, т. е. молекулы алкена соединяются друг с другом, образуя молекулы более тяжелого алкена.

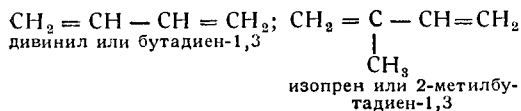
Этилен, или этен, C_2H_4 — бесцветный газ, плохо растворяющийся в воде и хорошо в органических растворителях. Горит на воздухе светящимся пламенем. В смеси с воздухом при поджигании взрывает; выше $350^\circ C$ разлагается. $t_{кип} = -102^\circ C$, $t_{пл} = -169^\circ C$; $d_4^{20} = 0,6095 \text{ г/см}^3$ (жидк.). Этилен содержится в светильном газе, продуктах сухой перегонки различных органических веществ и газах крекинга нефтяных продуктов. Этилен является сырьем для получения синтетического этилового спирта, синтетического каучука, взрывчатых веществ иприта, лекарственных веществ, пластмасс растворителей и других важных материалов. Этилен может заменять ацетилен в автогенной сварке. Этилен перевозится в стальных баллонах под давлением.

Изобутилен, или 2-метилпропен-1, C_4H_8 — бесцветный газ. $t_{кип} = -6^\circ C$. Содержится в газах крекинга нефтяных продуктов. Изобутилен является сырьем для получения изоктана, присадок к смазочным маслам и заменителей каучука.

Алкадиены, или диолефины

Так называются ациклические углеводороды состава C_nH_{2n-2} , содержащие две

двойные связи. Важнейшими из них являются:



полимеризацией которых получают синтетический каучук.

Дивинил — газ, конденсирующийся при $+4^\circ\text{C}$. Изопрен — жидкость, кипящая при 34°C .

Алкины, или ацетиленовые углеводороды

Общие положения. Алкинами называются ациклические углеводороды состава, выражаемого общей формулой $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$ (начиная с $n=2$) и имеющие одну тройную связь между двумя соседними углеродными атомами. Первым и важнейшим углеводородом этого ряда является ацетилен, или этин, C_2H_2 (со структурной формулой $\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$), вторым — аллилен C_3H_4 , или пропин ($\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{CH}_3$), и т. д.

Изомерия алкинов вызывается различным расположением тройной связи и различной структурой углеродного скелета (см. Изомерия алкенов, стр. 297).

Физические свойства алкинов. По физическим свойствам алкины сходны с алканами, цикланами и алкенами. Удельные веса алкинов несколько выше соответствующих алканов. Теплоты образования алкинов меньше соответствующих алкенов.

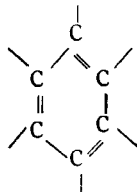
Химические свойства алкинов. Алкины ещё более реакционноспособны, чем алкены, благодаря наличию тройной связи. Для алкинов характерны реакции полимеризации и присоединения по месту тройной связи с переходом последней сначала в двойную, а затем в одинарную связь. Алкины легко присоединяют галоиды, водород (в присутствии катализатора — солей окиси ртути) и другие вещества.

Окисление алкинов сопровождается разрывом тройной связи. Водород у углеродного атома с тройной связью способен замещаться на металл.

Ацетилен, или этин, C_2H_2 — бесцветный газ, немного легче воздуха, плохо растворимый в воде и хорошо во многих органических растворителях. $t_{\text{кип}} = -84^\circ\text{C}$, $t_{\text{пл}} = -81^\circ\text{C}$. Горит коптящим пламенем. С воздухом образует взрывающиеся смеси в широком интервале концентраций (от 3 до 82% ацетилена). Ацетилен легко взрывается от детонации, в особенности в сжатом и сжиженном состоянии. В атмосфере кислорода ацетилен горит ослепительно-белым пламенем, температура которого достигает 3000° . Главная масса ацетилена получается действием воды на карбид кальция: $\text{CaC}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{C}_2\text{H}_2$. Ацетилен является сырьём для производства синтетического каучука, уксусной кислоты, изоляторов, растворителей и других материалов. Ацетилен перевозится в стальных баллонах в сжиженном состоянии.

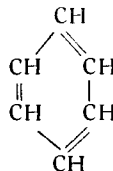
Ароматические углеводороды

Гомологический ряд бензола. Ряд углеводородов, содержащих в своих молекулах так называемое бензольное кольцо,



составляет гомологический ряд бензола.

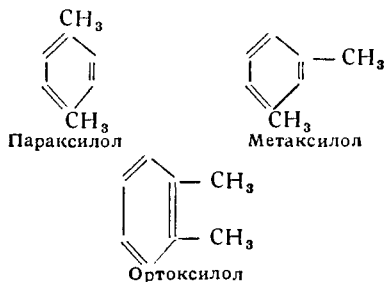
Первым представителем этого ряда является бензол, имеющий по Кекуле структуру:



Замещением атомов водорода в бензоле на углеводородные радикалы образуются гомологи бензола. Например, $\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}_3$ — толуол, $\text{C}_6\text{H}_5-\text{C}_2\text{H}_5$ — этилбензол, $\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}=\text{CH}_2$ — стирол и др.

Существуют, кроме того, двух-, трёх- и более замещённые гомологи бензола (например — см. ниже).

Изомерия углеводородов ряда бензола. Изомерия однозамещённых гомологов бензола может вызываться лишь изомерией бокового радикала. Изомерия двух- и более замещённых гомологов, кроме того, вызывается различным расположением радикалов в кольце. Например, существует три изомера ксилола:



сокращённо обозначаемые латинскими буквами *p*, *m*, *o*.

Физические свойства углеводородов ряда бензола. Первые представители ряда бензола — бесцветные жидкости, следующие — твёрдые тела. Все они обладают более или менее сильным специфическим запахом, не растворимы в воде, но хорошо растворимы в различных органических и неполярных неорганических растворителях. Удельный вес их меньше единицы. Горят коптящим пламенем.

Химические свойства углеводородов ряда бензола. Для бензола и его гомологов характерны реакции заме-

шения водородных атомов: галоидами (при обыкновенных условиях), сульфогруппой — SO_2OH (при действии крепкой или дымящей серной кислоты), нитрогруппой — NO_2 (при действии крепкой азотной кислоты) и др. Сильные окислители обычно окисляют боковые цепи, не разрушая бензольного кольца. Так, при окислении толуола образуется бензойная кислота. Бензол и его гомологи в присутствии катализатора — мелкоизмельченного никеля или палладия — присоединяют водород, образуя циклогексан и его гомологи (реакция, обратная дегидрированию цикланов).

Бензол C_6H_6 — бесцветная легкоподвижная и легколетучая жидкость. $t_{\text{кип}} = 80^\circ\text{C}$, $t_{\text{пл}} = 6^\circ\text{C}$; $d_4^{20} = 0,879 \text{ г/см}^3$. Не растворим в воде. Горит коптящим пламенем. Бензол находится в некоторых нефтях. Главная масса его получается из каменноугольного дёгтя — продукта сухой перегонки каменного угля и продуктов пиролиза жидких фракций нефти, получающихся нагреванием нефти выше $600-700^\circ\text{C}$. Бензол является сырьём для производства большого числа красителей, отравляющих веществ, лекарственных веществ и других материалов. Бензол широко применяется как растворитель.

Толуол $\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}_3$ — бесцветная легкоподвижная жидкость. $t_{\text{кип}} = 111^\circ\text{C}$; $t_{\text{пл}} = -95^\circ\text{C}$; $d_4^{20} = 0,867 \text{ г/см}^3$. Находится в небольших количествах в некоторых нефтях. Как и бензол, добывается из каменноугольной смолы и продукта гидролиза нефти.

Толуол является исходным материалом для производства многих красителей и взрывчатых веществ.

п-, м-, о-ксилолы — $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$ — бесцветные легкоподвижные жидкости. Применяются в качестве растворителя лаков и каучука, а также как сырьё для производства некоторых красителей.

Стирол $\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}=\text{CH}_2$ — бесцветная жидкость. $t_{\text{кип}} = 145^\circ\text{C}$; $d_4^{20} = 0,907 \text{ г/см}^3$. Получается каталитическим отщеплением водорода от этилбензола. Служит сырьём для получения электроизоляционных пластмасс и вместе с бутадиеном является исходным материалом для производства синтетического каучука — «Буна S».

Полициклические ароматические соединения. Углеводороды, содержащие в молекуле несколько бензольных ядер, называются полициклическими, или многоядерными, ароматическими соединениями. Те из них, у которых два или более бензольных ядра имеют общие углеродные атомы, называются ароматическими соединениями с конденсированными бензольными ядрами. Примерами полициклических ароматических соединений являются дифенил, нафталин, тетралин, декалин, антрацен, фенантрен, пинен и др.

Дифенил $\text{C}_6\text{H}_5 \cdot \text{C}_6\text{H}_5$. Название соединения происходит от названия радикала C_6H_5 — фенил. Замещением водородных атомов на углеводородные радикалы образуются гомологи дифенила. Сам дифенил представляет собой бесцветные кристаллы, плавящиеся при 70°C ; $d_4^{20} = 1,16 \text{ г/см}^3$. Небольшие ко-

личества его содержатся в каменноугольном дёгте. Производные дифенила (амины и др.), легко получающиеся из одноядерных ароматических соединений, служат исходным материалом для синтеза ряда красителей.

Нафталин C_{10}H_8 — является родоначальником гомологического ряда нафталина. Нафталин при обыкновенных условиях — твёрдое тело. Кристаллизуется в блестящих листочках; плавится при 80°C ; легко возгорается. Не растворим в воде, но хорошо растворим в органических растворителях. Обладает характерным запахом. Горит коптящим пламенем. Нафталин получается из каменноугольной смолы — продукта сухой перегонки каменного угля и применяется в качестве сырья для производства многих красителей.

Тетралин $\text{C}_{10}\text{H}_{12}$ — бесцветная жидкость. $t_{\text{кип}} = 205^\circ\text{C}$, $t_{\text{пл}} = -20^\circ\text{C}$; $d_4^{20} = 0,971 \text{ г/см}^3$. Получается гидрогенизацией нафталина в присутствии катализатора и мелкоизмельченного Ni под давлением. Применяется в качестве растворителя лаков.

Декалин $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$ — бесцветная жидкость, $t_{\text{кип}} = 190^\circ\text{C}$; $d_4^{20} = 0,89 \text{ г/см}^3$. Получается гидрогенизацией нафталина при избытке водорода. Применяется, как и тетралин, в качестве растворителя лаков.

Фенантрен $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ — кристаллизуется в блестящих листочках с температурой плавления 99°C . Находится в каменноугольном дёгте.

Пинен $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$ — является представителем терпенов — соединений с конденсированными шестичленным и четырёхчленным кольцами. Пинен — жидкость; является главной составной частью скипидаров. $t_{\text{кип}} = 156^\circ\text{C}$; $d_4^{20} = 0,858 \text{ г/см}^3$.

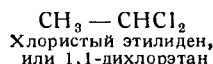
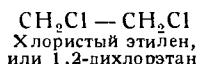
Галоидопроизводные углеводородов

Общие положения. Галоидопроизводными углеводородов называются соединения, которые получаются замещением водородных атомов в углеводородах на атомы галоидов. Замещением одного атома получаются однозамещённые, двух — двухзамещённые галоидопроизводные и т. д. Названия галоидопроизводных образуют или от наименования радикалов, с которыми связан галоид, или от углеводородов, от которых могут быть произведены эти соединения (жневская номенклатура). Например:

| | |
|--|---|
| CH_3Cl Хлористый метил, или хлорметан | CH_2Cl_2 Хлористый метилен, или дихлорметан |
| $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$ Бромистый этил, или бромэтан | $\text{CH}_2 = \text{CHCl}$ Хлористый винил, или хлорэтилен |
| $\text{C}_6\text{H}_5-\text{Cl}$ Хлористый фенил, или хлорбензол | $\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}_2\text{Cl}$ Хлористый бензоил |

Изомерия галоидопроизводных углеводородов. Изомерия галоидопроизводных углеводородов может происходить от изомерии углеводородного радикала и от различного положения атомов

галоида. Например, двухзамещенный этан имеет два изомера:



Физические свойства. Введение галоида в углеводород увеличивает удельный вес и повышает температуру кипения. Бромзамещенные имеют температуры кипения выше соответствующих хлорзамещенных, а иодзамещенные выше соответствующих бромзамещенных. Газами при обычных условиях являются хлорметан, хлорэтан и бромэтан. Большинство галоидозамещенных — бесцветные жидкости приторного запаха. Из твердых галоидозамещенных можно назвать триодметан CHJ_3 (иодформ). Все галоидозамещенные не растворимы в воде, но растворимы в органических растворителях и сами являются хорошими растворителями. Удельные веса бромистых и иодистых соединений больше единицы. Некоторые из галоидозамещенных обладают обезболивающими (анестезирующими) свойствами; все более или менее ядовиты.

Химические свойства. Галоидозамещенные алканов обладают высокой реакционной способностью. Они легко обменивают галоидные атомы на группы: OH , NH_2 , CN , NO_2 и др. Галоидозамещенные алкенов и ароматических углеводородов, в которых галоид находится в бензольном кольце, значительно менее реакционноспособны. Все галоидопроизводные реагируют с металлами (например Na , Zn , Mg), образуя углеводороды или металлоорганические соединения и соответствующие соли.

При действии сильных щелочей на галоидозамещенные алканы образуются алкены.

Хлорметан, хлористый метил CH_3Cl — газ, не растворимый в воде и растворимый в органических растворителях. $t_{\text{кип}} = -24^\circ\text{C}$, $t_{\text{пл}} = -92^\circ\text{C}$; $d_4^{20} = 0,952 \text{ г/см}^3$.

Хлороформ и иодоформ CHCl_3 и CHI_3 — по женевской номенклатуре трихлорметан и триодметан. Первый является тяжелой жидкостью при обычных условиях, второй — твердым веществом желтого цвета. Оба не растворяются в воде и не горят. $t_{\text{кип}} \text{CHCl}_3 = 61^\circ\text{C}$, $t_{\text{пл}} \text{CHCl}_3 = -63^\circ\text{C}$; $t_{\text{пл}} \text{CHI}_3 = 119^\circ\text{C}$; $d_4^{20} \text{CHCl}_3 = 1,488 \text{ г/см}^3$; $d_4^{20} \text{CHI}_3 = 4,008 \text{ г/см}^3$. Хлороформ применяется в медицине в смеси с эфиром как средство наркоза. Получается хлороформ действием белильной извести на спирт. Иодоформ применяется в медицине как антисептик. Оба на свету разлагаются.

Четыреххлористый углерод, тетрахлорметан, CCl_4 — бесцветная жидкость. $t_{\text{кип}} = 77^\circ\text{C}$, $t_{\text{пл}} = -23^\circ\text{C}$; $d_4^{20} = 1,594 \text{ г/см}^3$. Широко применяется как растворитель, особенно ценный тем, что не горит. Применяется для тушения пожаров в тех случаях, когда другие средства, например вода, могли бы испортить предметы.

Дихлорэтан, или 1,2-дихлорэтан, $\text{CH}_2\text{Cl}-\text{CH}_2\text{Cl}$ — тяжелая бесцветная жидкость. $t_{\text{кип}} = 84^\circ\text{C}$, $t_{\text{пл}} = -35^\circ\text{C}$; $d_4^{20} = 1,261 \text{ г/см}^3$. Несмотря на ядовитость, широко приме-

няется как растворитель благодаря дешевизне. Получается действием хлора на этилен.

Хлорбензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$ — бесцветная жидкость, $t_{\text{кип}} = 132^\circ\text{C}$, $t_{\text{пл}} = -45^\circ\text{C}$; $d_4^{20} = 1,106 \text{ г/см}^3$. Применяется как растворитель.

Хлористый бензил $\text{C}_6\text{H}_5\cdot\text{CH}_2\text{Cl}$ — название происходит от названия радикала бензил $\text{C}_6\text{H}_5\cdot\text{CH}_2\cdot$. Хлористый бензил — бесцветная жидкость с резким, вызывающим слезотечение запахом. $t_{\text{кип}} = 179^\circ\text{C}$, $t_{\text{пл}} = -39^\circ\text{C}$; $d_4^{20} = 1,113 \text{ г/см}^3$.

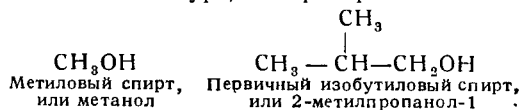
Спирты и фенолы

Общие положения. Спиртами, или алкоголями, называются соединения, которые получают замещением водородных атомов в углеводородах на гидроксильные группы. Спирты с гидроксильной группой в бензольном кольце называются фенолами, а с гидроксильной группой в боковой цепи — ароматическими спиртами.

Спирты и фенолы с одной гидроксильной группой называются одноатомными, например этиловый спирт $\text{CH}_3\cdot\text{CH}_2\text{OH}$, фенол $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ и др. Спирты и фенолы с двумя гидроксильными группами называются двухатомными, например этиленгликоль $\text{CH}_2\text{OH}-\text{CH}_2\text{OH}$, резорцин $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$ и др. Спирты и фенолы с тремя гидроксильными группами называются трехатомными, например глицерин $\text{CH}_2\text{OH}-\text{CHOH}-\text{CH}_2\text{OH}$, пирогаллол $\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})_3$ и др.

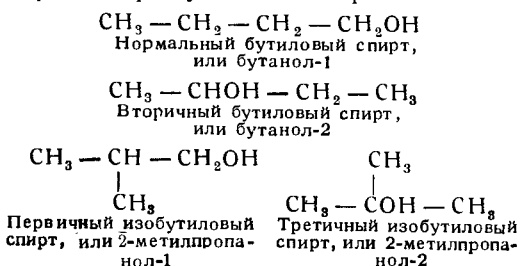
Номенклатура спиртов и фенолов. Спирты, в которых гидроксил связан с первичным углеродным атомом ($-\text{CH}_2\text{OH}$), называются первичными, с вторичным углеродным атомом ($-\text{CHOH}-$) — вторичными и с третичным углеродным атомом ($-\text{CON}-$) — третичными.

Наименование спиртов производится либо от радикала, с которым связан гидроксил, либо прибавлением окончания «ол» к названию углеводорода, отвечающего самой длинной цепи в молекуле спирта (женевская номенклатура). Например:

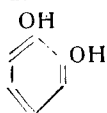


Одноатомный фенол, произведенный от бензола, называется фенолом, от толуола — крезолом.

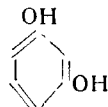
Изомерия спиртов и фенолов может быть вызвана изомерией углеродного скелета и различным расположением гидроксильных групп. Например, известны четыре изомера бутилового спирта:



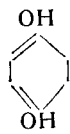
Известны три изомера двухатомного фенола:



Пирокатехин



Резорцин



Гидрохинон

Физические свойства спиртов и фенолов. При обычных условиях спирты — либо жидкости, либо твёрдые вещества (при большом молекулярном весе). Фенолы — все твёрдые. Низшие спирты смешиваются с водой во всех отношениях и хорошо растворимы в органических растворителях. С повышением молекулярного веса растворимость спиртов в воде уменьшается. Низшие фенолы плохо растворимы в воде, а высшие совсем нерастворимы, но все хорошо растворимы в органических растворителях.

Температуры кипения спиртов и фенолов выше соответствующих галоидопроизводных и тем более соответствующих углеводов. Многие спирты и в особенности фенолы ядовиты, применяются как дезинфицирующие средства.

Химические свойства спиртов и фенолов. Фенолы имеют слабокислую реакцию, поэтому сам фенол называют карболовой кислотой. Фенолы реагируют с сильными щелочами как слабые кислоты с образованием соединений, называемых фенолятами. Как фенолы, так и спирты взаимодействуют с щелочными металлами с образованием фенолятов и соответственно алкоголятов, хотя спирты имеют нейтральную реакцию. Дегидратация спиртов (концентрированной серной кислотой или в присутствии катализатора Al_2O_3 при высокой температуре) приводит, в зависимости от условий, либо к алкенам, либо к образованию простых эфиров. Фенолы не дегидратируются. Спирты, в отличие от углеводов, легко окисляются с образованием альдегидов (при окислении первичных спиртов) и кетонов (при окислении вторичных спиртов). Окисление третичных спиртов сопровождается разрывом углеродной цепи и образованием кислот. Фенолы также легко окисляются. При действии галоидангидридов кислот или галоидоводородных кислот на спирты образуются галоидопроизводные углеводов. Фенолы значительно легче нитруются, сульфурются, галоидируются и т. д., чем соответствующие им ароматические углеводороды.

Метиловый спирт, метанол, карбинол, или древесный спирт, CH_3OH — бесцветная легкоподвижная жидкость со спиртовым запахом. $t_{кип} = 65^\circ C$, $t_{пл} = -98^\circ C$; $d_4^{20} = 0,790 \text{ г/см}^3$. Метиловый спирт очень ядовит; отравление метанолом вызывает слепоту. Горит бледно-синим пламенем. Смешивается с водой во всех отношениях.

Метанол широко применяется как растворитель лаков, смол и как сырьё для производства формалина, некоторых красителей, отравляющих веществ. Метанол получается

при сухой перегонке дерева и синтетически из CO и H_2 (водяной газ) в присутствии катализаторов (ZnO , Cu и др.) при температуре $300^\circ C$ и давлении $150 - 600 \text{ ат}$.

Этиловый спирт, этанол, или винный спирт, CH_3-CH_2OH — бесцветная жидкость, смешивающаяся с водой во всех отношениях. $t_{кип} = 78^\circ C$, $t_{пл} = -114,15^\circ C$; $d_4^{20} = 0,806 \text{ г/см}^3$. Горит бледно-голубым пламенем. Находит широкое применение в технике как растворитель и сырьё для приготовления синтетического каучука, уксусной кислоты, эфира и других веществ. Технический спирт денатурируется прибавлением ядовитых веществ и какой-либо краски для распознавания. Этиловый спирт получают брожением сахаристых веществ и синтетически присоединением воды к этилену.

Изоамиловый спирт, или 2-метилбутанол-1, $(CH_3)_2CH-CH_2-CH_2OH$ — бесцветная маслянистая жидкость. $t_{кип} = 131^\circ C$; $d_4^{20} = 0,810 \text{ г/см}^3$. Изоамиловый спирт имеет неприятный запах; смешивается с водой во всех отношениях. Сильно ядовит. Примесь изоамилового спирта к этиловому придаёт последнему характерный «сивушный» запах и вкус.

Этиленгликоль, или этанол-1,2, CH_2OH-CH_2OH — бесцветная маслянистая жидкость, сладковатая на вкус, очень гигроскопична. $t_{кип} = 197^\circ C$, $t_{пл} = -12^\circ C$; $d_4^{20} = 1,109 \text{ г/см}^3$. Смешивается с водой во всех отношениях. Применяется как антифриза, т. е. для приготовления так называемых незамерзающих растворов для радиаторов двигателей внутреннего сгорания.

Глицерин, или пропанол-1,2,3, $CH_2OH-CH(OH)-CH_2OH$ — бесцветная, сиропообразная жидкость сладкого вкуса. $t_{кип} = 290^\circ C$, $t_{пл} = 19^\circ C$; $d_4^{20} = 1,260 \text{ г/см}^3$. Смешивается с водой во всех отношениях. Глицерин применяется как антифриза и в больших количествах в качестве сырья для производства нитроглицерина (нитроглицерин — сложный эфир глицерина и азотной кислоты — является сильно взрывчатым веществом); кроме того глицерин широко применяется в медицине, парфюмерной, кондитерской и других промышленности. Глицерин получается омылением жиров, которые являются сложными эфирами глицерина и жирных кислот, а также синтетически действием воды на пропилен (продукт крекинга нефти) в присутствии катализаторов и при высокой температуре.

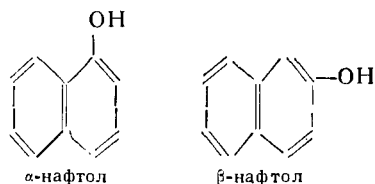
Фенол, или карболовая кислота, C_6H_5OH — бесцветное твёрдое кристаллическое вещество, краснеющее на воздухе вследствие медленного окисления. $t_{кип} = 182^\circ C$, $t_{пл} = 42,5^\circ C$; $d = 1,058 \text{ г/см}^3$ (60°). Фенол обладает характерным «карболовым» запахом, ядовит. Выше $68^\circ C$ смешивается с водой во всех отношениях; при обыкновенной температуре плохо растворяется в воде. Водный раствор фенола применяется для дезинфекции. Фенолом могут пропитываться шпалы для предупреждения гниения. Фенол служит сырьём для производства пластмасс, красителей, взрывчатых веществ, бакелитовых

лаков, лекарственных веществ и других материалов. Фенол содержится в каменноугольной смоле — продукте сухой перегонки каменного угля. Значительные количества его готовят синтетически из бензола.

п-, м-, о-крезолы $\text{CH}_3 - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{OH}$. Крезолы — твердые вещества, обладающие резким неприятным запахом. Водные растворы крезолов обладают сильными дезинфицирующими свойствами. Раствор мыла и крезолов, применяющийся для дезинфекции помещений, называется лизолом. Крезолами пропитываются шпалы для предупреждения гниения. Крезолы являются сырьем для производства пластмасс типа бакелита, красителей и взрывчатых веществ.

Крезолы содержатся в каменноугольной смоле — продукте сухой перегонки каменного угля.

Нафтолы. Замещением водородных атомов нафталина на гидроксильные группы получают нафтолы. Например:



По своим свойствам нафтолы похожи на фенолы. Нафтолы служат сырьем для производства красителей.

Альдегиды и кетоны

Общие положения. Соединения, содержащие карбонильную группу (>C=O), углеродный атом которой соединен с водородными атомами или углеводородными радикалами, относятся к двум классам органических соединений, называемых альдегидами и кетонами. В альдегидах углеродный атом карбонильной группы по крайней мере одной своей валентностью соединен с атомом водорода; в кетонах же этот атом обеими валентностями соединен с двумя углеводородными радикалами. Альдегиды и кетоны могут быть трактованы и как производные углеводородов, в которых два водородных атома при одном и том же углероде заменены атомом кислорода. Общую формулу альдегида можно записать

так: $\text{R}-\text{C}\begin{smallmatrix} \text{O} \\ \parallel \\ \text{H} \end{smallmatrix}$, кетона $\text{R}-\text{C}\begin{smallmatrix} \text{O} \\ \parallel \end{smallmatrix}-\text{R}$, где R—углеводородный радикал.

Номенклатура. Отдельные представители альдегидов и кетонов могут быть названы, исходя из принципа рациональной или женеvской номенклатуры. Иногда пользуются тривиальными названиями, применяя тривиальные названия кислот того же углеродного скелета, в которые альдегиды превращаются при окислении. Кетоны называют, характеризуя оба углеводородных радикала. В табл. II даны формулы и различные наименования некоторых низших альдегидов и кетонов.

Физические свойства. При обыкновенной температуре низшие альдегиды и кетоны, за исключением муравьиного альдегида, являющегося газообразным веществом, — жидкости, высшие же являются твердыми телами. Лишь первые представители альдегидов и кетонов растворимы в воде и смешиваются с ней. Высшие альдегиды и кетоны не растворимы в воде и растворяются лишь в органических растворителях.

Химические свойства. Альдегиды и кетоны легко окисляются. Альдегиды окисляются до соответствующих кислот, кетоны окисляются до кислот с разрывом цепи, с образованием смеси кислот, углеродные скелеты которых являются осколками скелета исходного кетона. Альдегиды и кетоны легко восстанавливаются, образуя спирты, за счет присоединения водорода по месту двойной связи карбонильной группы. Альдегиды и кетоны легко взаимодействуют со спиртами, аммиаком, гидроксиламином.

Муравьиный альдегид, формальдегид, или метанал, CH_2O — получается обычно окислением метилового спирта. Газ, сжижающийся при -21°C , легко растворимый в воде, обычно поступающий в продажу в виде 40%-ного раствора, называемого формалином, является хорошим дезинфицирующим веществом и средством консервирования препаратов. Служит исходным сырьем в производстве красящих веществ, пластических масс и фармацевтических препаратов. Газообразный формальдегид при обыкновенной температуре сам собой легко поли-

Названия и формулы альдегидов и кетонов

Таблица 11

| Альдегиды | | | Кетоны | | |
|---|--------------|-----------|--|--------------|------------|
| формула строения | наименование | | формула строения | наименование | |
| | тривиальное | женеvское | | рациональное | женеvское |
| $\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}=\text{O} \end{array}$ | Муравьиный | Метанал | $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3-\text{C}-\text{CH}_3 \end{array}$ | Диметил- | Пропанон |
| $\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{CH}_3-\text{C}=\text{O} \end{array}$ | Уксусный | Этанал | $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3-\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_3 \end{array}$ | Метилэтил- | Бутанон |
| $\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{C}=\text{O} \end{array}$ | Пропионовый | Пропанал | $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3-\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3 \end{array}$ | Метилпропил | Пентанон-2 |

меризуется; получающийся при этом твердый белый порошок носит название параформальдегида. При действии на формалин или формальдегид аммиака образуется кристаллическое очень гигроскопическое вещество состава $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ — гексаметилен-тетрамин, употребляемое в медицине под названием уротропина. Продукты конденсации формальдегида с фенолами образуют пластическую массу, называемую бакелитом. При конденсации формальдегида с казеином получается пластмасса, называемая галалитом.

Уксусный альдегид, ацетальдегид, или этанал, $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ — легколетучая жидкость с температурой кипения $20,2^\circ\text{C}$. Получается окислением этилового спирта или по реакции Кучерова действием воды на ацетилен в присутствии солей окиси ртути как катализаторов. Окислением ацетальдегида получается уксусная кислота. При действии на безводный альдегид одной капли концентрированной серной кислоты он превращается в тримерный паральдегид — жидкость с температурой кипения 124°C (CH_3CHO)₃. При более низких температурах из ацетальдегида образуется другая полимерная форма — метальдегид. Метальдегид — твердое вещество, нашедшее себе применение как горючее под названием «твердый спирт».

Бензойный альдегид, или бензальдегид, $\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}=\text{O}$ — жидкость с температурой кипения 179°C миндального запаха. Получается синтетически из фенилдихлорметана или умеренным окислением толуола. Широко употребляется в парфюмерии и в качестве исходного продукта в синтезе красящих веществ и других органических препаратов.

Фурфурол, или фурановый альдегид, $\text{C}_4\text{H}_3\text{O}-\text{CH}=\text{O}$ бесцветная жидкость с температурой кипения 162°C , желтеющая при стоянии, с запахом свежего ржаного хлеба. Получается отнятием воды от сахаристых веществ или действием серной кислоты на отруби. Применяется в производстве пластмасс и в нефтяной промышленности для селективной очистки масел.

Ацетон, или диметилкетон, CH_3COCH_3 — простейший кетон. Бесцветная жидкость со специфическим запахом и температурой кипения $56,1^\circ\text{C}$. Широко применяется в качестве растворителя и в качестве исходного продукта в целом ряде органических синтезов. Ацетон получается в промышленных масштабах сухой перегонкой кальциевой соли уксусной кислоты или брожением сахаристых веществ под влиянием специфических бактерий. Хлорацетон $\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{Cl}$ и бромацетон $\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{Br}$ применяются в качестве боевых отравляющих веществ слезоточивого действия.

Карбоновые кислоты

Органические соединения, в состав которых входит карбоксильная группа $-\text{C}(\text{OH})=\text{O}$,

относятся к классам органических или карбоновых кислот. В зависимости от числа карбоксильных групп карбоновые кислоты делятся на одноосновные, содержащие одну

карбоксильную группу, и многоосновные, содержащие больше чем одну карбоксильную группу.

Гомологические ряды, изомерия. Карбоновые кислоты можно себе представить как производные соответствующих углеводородов, у которых одна или несколько расположенных на концах углеводных цепей одновалентных метильных групп заменены карбоксильными группами. Каждому нормальному предельному углеводороду соответствует лишь одна одноосновная карбоновая кислота с тем же числом углеродных атомов и таким же углеродным скелетом. Простейшая одноосновная карбоновая кислота муравьиная $\text{H}-\text{COOH}$. Муравьиная кислота является родоначальником гомологического ряда предельных одноосновных кислот эмпирического состава $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{O}_2$. За муравьиной кислотой следуют её гомологи: уксусная кислота CH_3COOH , пропионовая кислота $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$, масляная кислота $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ и т. д. Число изомерных карбоновых кислот, соответствующих углеводородам изостроения, зависит от строения этих углеводородов.

CH_3
|
Так, из изобутана $\text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}_3$ можно произвести только одну кислоту, изомерную с нормальной масляной кислотой и называемую изомасляной кислотой.

Номенклатура. Женевская номенклатура к карбоновым кислотам применяется редко. В ряду карбоновых кислот, а также их производных широко применяются тривиальные названия. Эти названия чаще всего связаны с наименованием либо природных продуктов, из которых эти кислоты были впервые выделены, либо исходных продуктов, из которых они получают синтетически. Таковы, например, широко применяемые названия: муравьиная, уксусная, янтарная, винная, яблочная и т. д.

Физические свойства. Органические кислоты являются в подавляющем большинстве бесцветными веществами. Низшие представители предельных одноосновных кислот и некоторые непредельные одноосновные кислоты являются жидкими при обыкновенной температуре веществами. Высшие предельные кислоты и большинство кислот высшей основности являются твердыми, хорошо кристаллизующимися телами. Низшие кислоты обладают острым специфическим запахом, в безводном состоянии весьма едки и вызывают появление на коже пузырей. В ряду одноосновных кислот низшие представители смешиваются с водой во всех отношениях. По мере удлинения углеводородного радикала растворимость в воде падает. Высшие предельные кислоты, как например пальмитиновая и стеариновая, в воде не растворяются. Двухосновные кислоты показывают большую растворимость в воде, чем соответствующие им по углеводному составу одноосновные кислоты.

Химические свойства. Карбоновые кислоты являются слабыми кислотами. Из их солей с различными металлами более сильные минеральные кислоты вытесняют

свободные карбоновые кислоты. Соли одноосновных кислот со щелочными металлами в водных растворах способны гидролизываться, что проявляется в слабой щёлочности этих водных растворов. Растворы натриевых или калиевых солей одноосновных кислот с высоким молекулярным весом, как пальмитиновая, стеариновая или олеиновая, обладают способностью образовывать стойкие эмульсии, вспениваться и широко применяются под названием мыл. Многоосновные кислоты образуют соли, как нейтральные, так и кислые.

Производные карбоновых кислот. Хлорангидриды карбоновых кислот. Хлорангидридами карбоновых кислот называют соедине-

ния общей формулы $R-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-Cl$, где R — углеводородный радикал. Эти соединения можно рассматривать как продукты замещения гидроксильной группы атома хлора. Например, хлорангидрид уксусной кислоты будет иметь формулу: CH_3COCl . В присутствии воды хлорангидриды гидролизуются с образованием соответствующих кислот.

Амиды кислот — соединения общей формулы $R-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-NH_2$. Амиды кислот представляют собой нейтральные вещества, не склонные к реакциям солеобразования. Амиды подвергаются гидролизу с образованием аммиака и соответствующей органической кислоты.

Ангидриды карбоновых кислот. Общая формула строения этих соединений $R-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-O-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-R$. Их можно рассматривать как продукт отщепления воды от двух молекул кислоты.

Сложные эфиры карбоновых кислот — соединения общей формулы $R-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-O-R$. Их можно рассматривать как продукты отщепления одной молекулы воды от молекулы карбоновой кислоты и молекулы спирта. Сложные эфиры плохо растворимы в воде, но хорошо растворимы в органических растворителях. Подобно другим производным кислот сложные эфиры подвергаются гидролизу с образованием соответствующей карбоновой кислоты и спирта.

Нитрилы — соединения общей формулы $R-C\equiv N$. Нитрилы с небольшим молекулярным весом представляют собой жидкости. Низшие нитрилы хорошо растворимы в воде. При взаимодействии с водой гидролизуются с образованием карбоновой кислоты и аммиака; при обычной температуре гидролиз идёт медленно.

Муравьиная кислота $H-COOH$ — жидкость с температурой кипения $105^\circ C$. Обладает крайне острым запахом; смешивается с водой во всех отношениях; 1,25%-ный раствор её известен под названием муравьиного спирта. Муравьиная кислота гораздо сильнее других карбоновых кислот; по степени диссо-

циации она приближается к фосфорной кислоте. Применяется как протрава при крашении тканей, а также в качестве дезинфицирующего вещества в пищевой промышленности.

Уксусная кислота CH_3COOH . В безводном состоянии образует кристаллическую, похожую на лёд массу, плавящуюся при температуре $16,5^\circ C$ и потому называемую иногда «ледяной уксусной кислотой». Кипит при температуре $118^\circ C$. Уксусная кислота растворяется во всех отношениях в воде, спирте, эфире. Она содержится (2—3%) в уксусе. Уксусная кислота широко применяется в технике для приготовления многих красящих веществ, фармацевтических препаратов, ацетона, искусственного волокна, пластических масс, белил и других важных продуктов. Из производных уксусной кислоты важное значение имеют: а) ацетаты алюминия и железа, применяемые при окраске тканей; б) уксусноэтиловый эфир, или этилацетат, $CH_3COOC_2H_5$ — жидкость с ароматным запахом, с температурой кипения $77^\circ C$, применяется как растворитель органических веществ; в) уксусно-изоамиловый эфир $CH_3COOC_5H_{11}$ — жидкость с температурой кипения $65^\circ C$, обладает своеобразным запахом («грушевая эссенция»), широко применяется как растворитель лаков и в частности целлулоида;

г) ангидрид уксусной кислоты $CH_3-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-O-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-CH_3$ — жидкость с резким запахом, с температурой кипения $139,6^\circ C$, применяется для введения ацетильных групп в другие соединения, например при получении ацетилцеллюлозы; д) амид уксусной кислоты, или ацетамид, CH_3CONH_2 — кристаллическое вещество с температурой плавления $82^\circ C$, растворимое в воде, является исходным продуктом в ряде органических синтезов.

Пальмитиновая кислота $C_{15}H_{31}-COOH$ — твёрдое вещество с температурой плавления $62,6^\circ$; входит в состав растительных и животных масел.

Стеариновая кислота $C_{17}H_{35}-COOH$ — твёрдое тело с температурой плавления $69,3^\circ C$; также входит в состав жиров; в смеси с пальмитиновой кислотой представляет собой так называемый стеарин.

Олеиновая кислота $C_{17}H_{33}-COOH$ — жидкость, застывающая при температуре $14^\circ C$; входит в состав растительных жиров; содержит одну двойную связь и после гидрирования переходит в стеариновую кислоту.

Щавелевая кислота $HOOC-COOH$ — является двухосновной карбоновой кислотой. Она представляет собой твёрдое вещество, кристаллизующееся с двумя молекулами воды $(COOH)_2 \cdot 2H_2O$, хорошо растворима в воде. Щавелевая кислота проявляет довольно сильные кислотные свойства, ядовита. Соли щавелевой кислоты называются оксалатами.

Бензойная кислота C_6H_5-COOH — кристаллическое вещество с температурой плавления

ния 122,5° С. Первый представитель ароматических карбоновых кислот. Применяется для изготовления фармацевтических препаратов и красящих веществ.

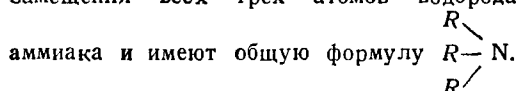
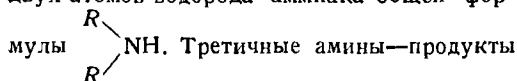
Жиры. Растительные и животные жиры представляют собой в основном смесь различных сложных эфиров, образованных трёхатомным спиртом—глицерином и карбоновыми кислотами, среди которых преобладают кислоты: стеариновая $C_{17}H_{35}COOH$, пальмитиновая $C_{15}H_{31}COOH$, олеиновая $C_{17}H_{33}COOH$. Эти сложные эфиры называются глицеридами. Глицериды предельных кислот представляют собой твёрдые вещества, а глицериды непредельных кислот—жидкости; первые встречаются большей частью в организме животных, вторые — в плодах растений. Все жиры легче воды, в воде не растворимы, хорошо растворимы в органических растворителях: бензине, эфире, четырёххлористом углероде, дихлорэтано, сероуглероде.

Мыла. Мылами называют соли высокомолекулярных органических кислот. Твёрдые мыла — натриевые соли жирных кислот, жидкие мыла — калиевые соли жирных кислот. Мыло можно получить, действуя на жирную кислоту щёлочью или содой или действуя щёлочью непосредственно на жир.

Воск. Воск состоит главным образом из сложных эфиров одноатомных спиртов с большим молекулярным весом и высокомолекулярных жирных кислот.

Азотсодержащие производные углеводов, амины цепные и кольчатые

Амины можно рассматривать как продукты замещения атомов водорода аммиака NH_3 углеводородными радикалами R . Первичные амины являются продуктами замещения одного атома водорода аммиака и имеют общую формулу RNH_2 . Вторичные амины являются продуктами замещения двух атомов водорода аммиака общей формулы



Группа атомов NH_2 называется аминогруппой. Если в молекуле содержится одна аминогруппа, то амин называется одноатомным. В молекулах многоатомных аминов содержится несколько аминогрупп.

Физические свойства. Первые представители аминов жирного ряда являются газами. Следующие за ними, равно, как и первые ароматические амины,—жидкости и лишь высшие представители—твёрдые тела. Низшие амины жирного ряда обладают специфическим аммиакоподобным, но более острым запахом. По мере увеличения молекулярного веса уменьшается и летучесть аминов. Некоторые низшие амины обладают селёдонным запахом.

Химические свойства. Химическая природа амина зависит от характера

соединённого с аминогруппой радикала и от специфических особенностей аминогрупп. Последние, являясь остатками аммиака, сообщают содержащим их соединениям основной характер, усиливаемый или ослабляемый соединёнными с аминоазотом радикалами. Так, например, метиламин CH_3NH_2 является более сильным основанием, чем аммиак NH_3 , т. е. алкильные радикалы усиливают основной характер аминогруппы. Ароматические радикалы играют обратную роль. Все амины с кислотами дают соли, подобные солям аммония и носящие аналогичные названия, например метиламин, присоединяя соляную кислоту, даёт хлористый метиламмоний или хлористоводородный метиламин $CH_3NH_2 \cdot HCl$. Соли аминов представляют собой кристаллические, растворимые в воде вещества. Из образовавшихся солей могут быть выделены свободные амины действием щёлочей. Амины можно считать органическими основаниями.

Метиламин CH_3NH_2 —бесцветный газ с запахом аммиака, температура кипения $-6^\circ C$. Встречается при распаде некоторых природных веществ, особенно белковых. Легко растворим в воде, образуя раствор гидрата окиси метиламмония, являющегося более сильным основанием, чем гидрат окиси аммония.

Анилин, или фениламин, $C_6H_5NH_2$ —жидкость с температурой кипения $184^\circ C$, со специфическим запахом. Широко применяется в качестве исходного продукта для синтеза различных органических веществ, иногда называемых поэтому анилиновыми.

Нафтиламин-альфа $C_{10}H_7NH_2$ —бесцветные, темнеющие на воздухе кристаллы с температурой плавления $50^\circ C$. Обладают весьма неприятным фенольным запахом. Альфа-нафтиламин и различные его сульфокислоты применяются для производства различных азокрасителей.

Нафтиламин-бета $C_{10}H_7NH_2$ —изомер предыдущего. Бесцветные кристаллы с температурой плавления $112^\circ C$. Применяется для производства различных красителей.

Нитросоединения цепные и кольчатые

Нитросоединениями называются вещества, содержащие нитрогруппу $-N \begin{smallmatrix} \nearrow O \\ \searrow O \end{smallmatrix}$, азот

которой непосредственно связан с углеродом. Гомологический ряд нитросоединений ряда метана начинается с нитрометана $CH_3 \cdot NO_2$, бензола—с нитробензола $C_6H_5 \cdot NO_2$. Названия нитросоединений как по старой, так и по женеvской номенклатуре производятся от углеводов с приставкой впереди слова «нитро».

Физические свойства. Низшие гомологи нитросоединений парафинового ряда—жидкости, не растворимые в воде, смешивающиеся со спиртом и эфиром. Удельные веса низших нитросоединений больше единицы; при повышении молекулярного веса удельный вес нитросоединений уменьшается. Низшие гомологи нитросоединений ароматического ряда—жидкости с высокой

температурой кипения. Вообще полинитросоединения ароматических углеводородов являются твердыми веществами. Обычно ароматические нитросоединения окрашены в желтый цвет. Они не растворимы в воде и в водных кислотах или щелочах и, следовательно, являются нейтральными веществами.

Химические свойства. По мере увеличения числа нитрогрупп возрастает способность нитросоединений взрываться от удара или детонации, некоторые из полинитросоединений широко применяются в военной технике для начинки снарядов, бомб, мин и т. п. В результате восстановления нитросоединений получаются амины.

Нитробензол $C_6H_5NO_2$ — светложелтая жидкость, тяжелее воды, с резким запахом, напоминающим запах горького миндаля. Ядовит. Применяется в больших количествах при производстве анилина; кроме того, применяется в парфюмерии.

2, 4, 6-тринитротолуол (тротил, тол) $CH_3C_6H_2(NO_2)_3$ — твердое вещество желтого цвета, плавящееся при температуре $81,5^\circ C$. Он является одним из наиболее важных бризантных (дробящих) взрывчатых веществ и применяется в значительном количестве для снаряжения артиллерийских снарядов, мин, подрывных шашек и т. п. Зажженный тротил горит коптящим пламенем не взрываясь и вполне безопасен в обращении, только от детонатора он сильно взрывает. В смеси с нитратом аммония применяется для подрывных работ под названием «аммонал».

Тринитрофенол (пикриновая кислота) $C_6H_2(OH)(NO_2)_3$ — светложелтое кристаллическое вещество с температурой плавления $122^\circ C$. Щелочные соли пикриновой кислоты применяются в качестве взрывчатых веществ под названием «мелинит».

Серосодержащие производные

Тиоспирты и тиофенолы. Тиоспирты и тиофенолы характеризуются наличием в их составе сульфогидрильной группы $-SH$. Строение тиоспиртов и тиофенолов может быть выражено общей формулой $R-SH$ (где R — углеводородный радикал). Поэтому их можно рассматривать как продукты замещения водорода в сероводороде на углеводородный радикал. Тиоспирты и тиофенолы называются меркаптанами. Для их полной характеристики перед словом меркаптан пишется название углеводородного радикала. Так, например, соединение CH_3SH называется метилмеркаптан, CH_3CH_2SH — этилмеркаптан, C_6H_5SH — фенилмеркаптан.

Низшие меркаптаны кипят при более низких температурах, чем соответствующие им по углеводородному скелету спирты. Они обладают чрезвычайно неприятным запахом, более сильным, чем запах сероводорода.

Меркаптаны как содержащие остаток сероводорода — слабой кислоты — также имеют слабокислые свойства. Это проявляется в том, что водород SH группы замещается на металл при действии гидратов окисей щелочных металлов, при действии щелочными металлами и при действии осно-

ваниями тяжелых металлов. Эти соединения, называемые меркаптидами, не растворяются в воде.

Тиозфиры, или сульфиды. При обработке меркаптидов галоидопроизводными углеводородов образуются тиозфиры, или сульфиды, — соединения общей формулы $R-S-R$. Их можно рассматривать как производные сероводорода, у которых оба атома водорода заменены углеводородными радикалами, например CH_3SCH_3 — диметилсульфид, $CH_3CH_2SCH_2CH_3$ — диэтилсульфид. Меркаптаны и тиозфиры содержатся в нефтях Второго Баку и придают им специфический неприятный запах.

Этилмеркаптан C_2H_5SH — бесцветная жидкость с температурой кипения $37^\circ C$, весьма неприятного запаха. Применяется для обнаружения пропусков в трубопроводах, в частности при испытании газовых сетей. Примешивается в небольших количествах к естественному метановому газу при применении его для бытовых целей.

ββ'-дихлорэтилсульфид (иприт) $ClCH_2CH_2SCH_2CH_2Cl$ — в неочищенном виде представляет собой темную бурю жидкость с запахом горчицы, лука или чеснока. Кипит при температуре $217^\circ C$, затвердевает при температуре $14^\circ C$, относится к числу стойких отравляющих веществ, проникает через обувь и платье и вызывает нарывы, болезненные пузыри и ожоги.

Сульфокислоты — органические сульфокислоты, называемые иногда сульфоновыми кислотами. Характеризуются наличием в них остатка серной кислоты, называемого суль-

фогруппой $\begin{array}{c} O \\ || \\ -S-OH, \text{ и имеют общее строение} \\ || \\ O \end{array}$

RSO_3H . Наиболее интересны ароматические сульфокислоты и их производные, получаемые непосредственным сульфированием ароматических углеводородов, аминов, фенолов и тому подобных соединений. Ароматические сульфокислоты — кристаллические вещества, хорошо растворимые в воде. Подобно серной кислоте, очень гигроскопичны. Они являются сильными кислотами. С металлами, основными окислами и основаниями сульфокислоты образуют соли.

Бензолсульфокислота $C_6H_5SO_3H$ — белое кристаллическое вещество, очень хорошо растворимое в воде, обладает сильными кислотными свойствами. Обычно выделяется в виде натриевой соли $C_6H_5SO_3Na$. Служит исходным сырьем для получения фенола.

Сульфоновая кислота, анилин-парасульфокислота или парааминобензолсульфокислота $NH_2C_6H_4SO_3H$ — белые кристаллы, хорошо растворимые в горячей воде, плохо растворимые в холодной воде. Широко применяется для производства азокрасителей.

Металлоорганические соединения

Общая характеристика. Соединения, в молекулах которых атом углерода связан с атомом металла, называются металлоорганическими, например CH_3Li-

метиллитий, $\text{C}_2\text{H}_5\text{ZnC}_2\text{H}_5$ — диэтилцинк, $\text{C}_2\text{H}_5\text{PbC}_2\text{H}_5$ — тетраэтилсвинец. Если с атомом металла связан ещё и неорганический остаток, то такое соединение называют смешанным металлоорганическим соединением, например CH_3MgI — иодистый метилмагний. Металлоорганические соединения представляют обширный класс соединений. В настоящее время известны металлоорганические соединения большинства металлов. Многие металлоорганические соединения весьма реакционноспособны, поэтому используются в лабораторной практике для синтеза различных органических веществ.

Тетраэтилсвинец $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ — прозрачная бесцветная жидкость с неприятным запахом, пары которой весьма ядовиты. Он не растворяется в воде, но растворим в органических растворителях. Если поджечь тетраэтилсвинец, то он горит на воздухе большим пламенем с образованием желтовато-белого дыма, состоящего из частиц окиси свинца. Применяется как антидетонатор для моторного топлива.

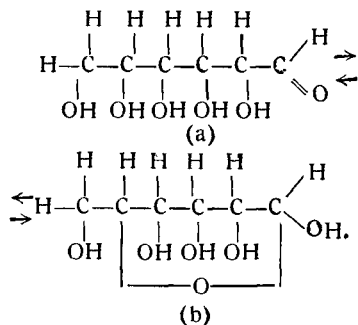
Производные углеводородов, содержащие различные функциональные группы

Углеводы. Название «углеводы» является устаревшим. Оно относится к тому времени, когда считали, что в соединениях этого типа углерод, водород и кислород находятся в тех же соотношениях, что и в гидратах углерода, и, следовательно, соответствуют общей формуле $\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_m$. Современное учение относит к классу углеводов все соединения, имеющие характер сахаров и близкие им по строению или характеру вещества. Углеводы делятся на: а) моносахариды, или простые сахара, например виноградный сахар (глюкоза), фруктовый сахар (фруктоза); б) сахароподобные полисахариды, построенные из моносахаридов и ещё довольно близкие им по растворимости, вкусу и химическому характеру; среди них тростниковый, солодовый и молочный сахар; в) несхароподобные полисахариды, которые являются продуктами конденсации простых сахаров, но они уже не дают истинных водных растворов, а в лучшем случае образуют коллоидные растворы. И в других отношениях они также значительно отличаются от простых сахаров, например крахмал, клетчатка (целлюлоза).

Моносахариды. Моносахариды существуют в виде двух форм, находящихся в равновесии: окисной формы и формы оксигидридов (альдоз) или оксикетонов (кетоз) с открытой цепью (см. ниже на примере глюкозы и фруктозы). Моносахариды представляют собой нейтральные вещества, легко растворимые в воде и трудно — в спирте; в эфире они совсем не растворяются. Все природные моносахариды обладают оптической активностью (вращают плоскость поляризации света). Моносахариды являются сильными восстановителями. При окислении альдоз слабым окислителем образуются оксикислоты с тем же числом углеродных атомов, под действием сильных окислителей обра-

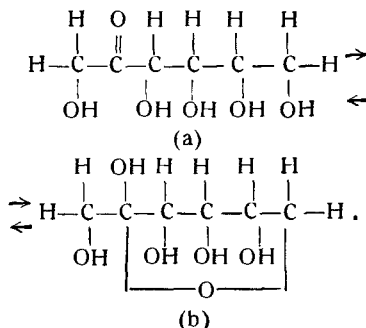
зуются дикарбоновые кислоты. При окислении кетоз получаются две кислоты, в каждой из которых содержится меньшее число атомов углерода, чем в исходном веществе. Моносахариды способны образовывать эфиры и алкоголяты (сахараты).

Глюкоза, декстроза, или виноградный сахар, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ — представляет собой смесь двух форм: оксигидрида (а) и окисной (б), находящихся в равновесии:



В твёрдом состоянии равновесие сильно смещено в сторону окисной формы (б). В окисной форме не все гидроксилы (ОН) равноценны. Один из них, связанный с атомом углерода, при котором имеется «эфирный кислород» (кислород, связанный со вторым и последним атомами углерода), отличен от других и называется глюкозидным гидроксидом. Глюкоза представляет собой белое твёрдое кристаллическое вещество, хорошо растворимое в воде и обладающее сладким вкусом, несколько более слабым, чем у обыкновенного сахара. Содержится почти во всех тканях животных и растений, особенно много в винограде и других сладких плодах.

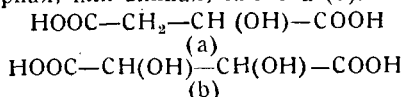
Фруктоза $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ имеет одинаковую bruttoформулу с глюкозой, но отличное строение; так же, как и глюкоза, представляет собой равновесную смесь двух форм: оксикетона (а) и окисной (б):



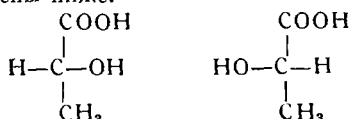
Фруктоза находится во многих сладких плодах вместе с глюкозой. Смесь глюкозы и фруктозы является главной составной частью мёда. Фруктоза обладает более сладким вкусом, чем обыкновенный свекловичный сахар.

Полисахариды. Углеводы, из одной молекулы которых образуются при гидролизе две, три и больше молекул моносахаридов,

Известны также и двухосновные оксикислоты. Примером могут служить оксиптарная, или яблочная, кислота (a) и диоксиптарная, или винная, кислота (b):



Молочная кислота $\text{CH}_3^*\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}$ — густая сиропообразная жидкость, реагирует и как кислота и как спирт. Существует в двух пространственно-изомерных формах, вращающих плоскость поляризации в разные стороны. Это свойство вызвано тем обстоятельством, что в состав этой кислоты входит асимметрический атом углерода, отмеченный звёздочкой. Асимметрическим атомом углерода называют атом, который соединён с четырьмя различными атомами или группами атомов. Проекция моделей пространственно-изомерных молочных кислот приведены ниже:

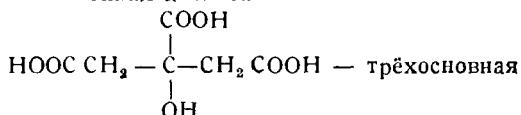


Вещества, имеющие одинаковый состав и строение, но отличающиеся пространственным расположением атомов в молекуле, называются стереоизомерами, а самое явление — стереоизомерией. Существует три молочные кислоты: правовращающая молочная кислота, левовращающая молочная кислота и оптически-недействительная кислота, представляющая собой смесь равных количеств право- и левовращающих молочных кислот. Вещества, подобные оптически-недействительной молочной кислоте, которые можно разделить на оптические антиподы, называют рацемическими или рацематами. Рацемическая молочная кислота образуется при молочнокислом брожении сахаристых веществ. Она содержится в кислом молоке, квашеной капусте, силосованных кормах. Правовращающая молочная кислота содержится в мышечных тканях. Под действием специальных бактерий путём брожения сахара может быть получена левовращающая молочная кислота.

Винная кислота

$\text{HOOC}^*\text{CH}(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})^*\text{COOH}$ — содержит два асимметрических атома углерода. В природе встречается правовращающая винная кислота. Она содержится в плодах в свободном состоянии или в виде солей «тартратов». Калиевая соль винной кислоты — винный камень и винная кислота — находят применение как протрава при крашении тканей.

Лимонная кислота



оксикислота. Принадлежит к самым распространённым кислотам, содержащимся в растениях. Много её содержится в незрелых лимонах и листьях табака.

Угольная кислота. Угольную кислоту H_2CO_3 можно рассматривать как оксигидрат углекислоты. К производным угольной кислоты относятся фосген и мочевины.

Фосген $\text{Cl}_2\text{C}=\text{O}$ — хлорангидрид угольной кислоты. Бесцветный газ с температурой кипения $+8^\circ\text{C}$; поражает дыхательные органы и обладает удушающим действием. Запах фосгена напоминает запах гнилого сена.

Мочевина NH_2CONH_2 — амид угольной кислоты. Твёрдое кристаллическое вещество с температурой плавления 135° , хорошо растворимо в воде. Является ценным удобрением. Применяется для изготовления пластических масс и химико-фармацевтических препаратов.

Аминокислоты

Аминокислоты — соединения, содержащие в своём составе и аминогруппы (NH_2) и карбоксильные группы. Аминокислоты можно трактовать как производные карбоновых кислот, в которых атомы водорода при углеродном скелете замещены аминогруппами, например, соответственно замещённые производные уксусной кислоты — аминокислота, называемая гликолем или глицином, имеет строение $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$. Аминокислоты являются бесцветными кристаллическими веществами, обычно сладкого вкуса. Почти все аминокислоты природного происхождения являются оптически активными. Аминокислоты имеют исключительно большое биологическое значение, так как они входят в состав различных природных белков, главной составной части протоплазмы всех клеток. Присутствие аминогруппы и карбоксила определяет двойственный характер аминокислот. Они обладают как основными, так и кислотными свойствами, образуют со спиртами сложные эфиры, а с основаниями — соли, как все кислоты, и образуют соли с кислотами, так же как и амины. Поэтому их нужно отнести к ряду амфотерных соединений.

Белки (протеины)

Всякий организм содержит белки. Белки входят в состав протоплазмы всех клеток. Белки трудно получить в чистом виде, поэтому их точный состав в большинстве случаев неизвестен. В состав белков входят углерод, водород, кислород, азот, сера и иногда фосфор. Белки нестойкие вещества. При кипячении с водой и под действием спирта они свёртываются. Все белки оптически-деятельны. Конечным продуктом гидролиза белков являются аминокислоты. Белок не только является основой жизни, но имеет и большое техническое применение. Белками являются шерсть, шёлк, кожа, волос, рог.

Гетероциклические соединения

Гетероциклическими называются соединения, молекулы которых содержат замкнутую цепь атомов, состоящую не только из атомов углерода, но и атомов других элементов. Гетероциклические соединения широко распространены в природе. Соедине-

ния, состоящие из одного или нескольких гетероциклических ядер, преимущественно содержащих азот, содержащиеся в растениях и обладающие сильным физиологическим действием, получили название алколоидов. К ним относятся: никотин из листьев табака, кофеин из чая и кофе, теобромин из бобов какао, кокаин из листьев кока, хинин из коры хинного дерева, морфий — один из главнейших алколоидов опиума и много других. К важнейшим пятичленным гетероциклам, в состав кольца которых входит лишь один гетероатом, относятся:

Пиррол C_4H_4NH — бесцветная жидкость, кипящая при температуре $130^\circ C$, очень легко окисляется, содержится в каменноугольном дёгте и в костяном масле, получаемом при сухой перегонке костей. Зелёное красящее вещество растений хлорофил и красное красящее вещество крови — гемоглобин содержат пиррольные кольца.

Фуран C_4H_4O — бесцветная жидкость, кипящая при температуре $32^\circ C$, не растворимая в воде. Важнейшим производным фурана является альдегид фурфурол (см. Фурфурол, стр. 314).

Таблица 12

Структурные формулы некоторых важнейших циклических органических соединений

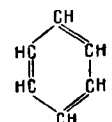
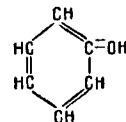
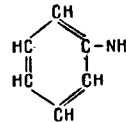
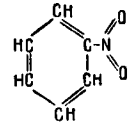
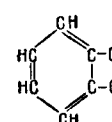
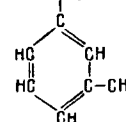
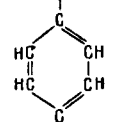
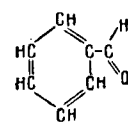
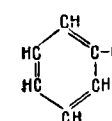
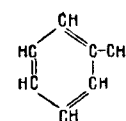
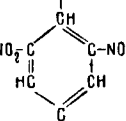
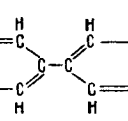
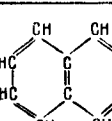
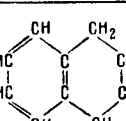
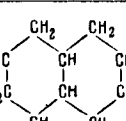
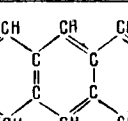
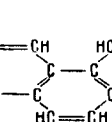
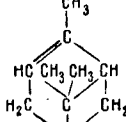
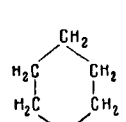
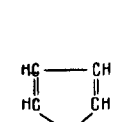
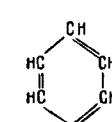
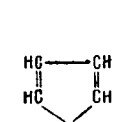
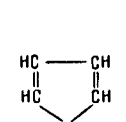
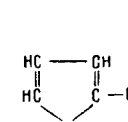
| | | | |
|--|--|--|---|
|  Бензол (C_6H_6) |  Фенол (C_6H_5OH) |  Анилин ($C_6H_5NH_2$) |  Нитробензол ($C_6H_5NO_2$) |
|  o-ксилол (C_8H_{10}) |  m-ксилол (C_8H_{10}) |  p-ксилол (C_8H_{10}) |  бензальдегид (C_7H_6O) |
|  Бензойная кислота ($C_7H_6O_2$) |  Стирол (C_8H_8) |  Пикриновая кислота ($C_6H_3(NO_2)_3$) |  Дифенил ($C_{12}H_{10}$) |
|  Нафталин ($C_{10}H_8$) |  Тетралин ($C_{10}H_{12}$) |  Декалин ($C_{10}H_{18}$) |  Антрацен ($C_{14}H_{10}$) |
|  Фенантрен ($C_{14}H_{10}$) |  Пинен ($C_{10}H_{16}$) |  Циклогексан (C_6H_{12}) |  Тиофен (C_4H_4S) |
|  Пиридин (C_5H_5N) |  Пиррол (C_4H_4NH) |  Фуран (C_4H_4O) |  Фурфурол ($C_5H_4O_2$) |

Таблица 13

Свойства органических соединений

| Название | Формула | Молекулярный вес | Уд. веса | Температура | | Внешний вид | Характерные свойства |
|--|--|------------------|----------|--------------|------------------|--|---|
| | | | | плавления °C | кипения °C (760) | | |
| Акриловая кислота . | $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{COOH}$ | 72,03 | 1,062 | 13 | 141 | Бесцветная жидкость | Острый кислотный запах |
| Акролеин | $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CHO}$ | 56,03 | 0,841 | — | 52 | То же | Острый запах подгоревшего жира, раздражает слизистую оболочку |
| Ализарин | $\text{C}_{14} \text{O}_6 \text{H}_6 (\text{OH})_2$ | 240,06 | — | 289 | 430 | Красные иглы | Краска |
| Аллиловый спирт . . | $\text{CH}_2 = \text{CH} \cdot \text{CH}_2 \text{OH}$ | 58,05 | 0,855 | —129 | 97 | Бесцветная жидкость | |
| Амиловый спирт норм. первичный . | $\text{C}_5 \text{H}_{11} \text{OH}$ | 88,10 | 0,815 | — | 138 | То же | |
| Анилин | $\text{C}_6 \text{H}_5 \cdot \text{NH}_2$ | 93,06 | 1,022 | —6 | 184 | Бесцветная жидкость, бурет на воздухе | Ядовит |
| Антрацен | $\text{C}_{14} \text{H}_{10}$ | 178,08 | 1,242 | 217 | 351 | Бесцветные призмы с голубой флуоресценцией | |
| Ацетальдегид (см. Уксусный альдегид) | | | | | | | |
| Ацетамид | $\text{CH}_3 \cdot \text{CO} \cdot \text{NH}_2$ | 59,05 | 1,159 | 80 | 222 | Бесцветные кристаллы | Разлагается |
| Ацетон | $\text{CH}_3 \cdot \text{CO} \cdot \text{CH}_3$ | 58,05 | 0,792 | —94 | 56 | Бесцветная жидкость | Хороший растворитель |
| Ацетилен | $\text{C}_2 \text{H}_2$ | 26,02 | — | —81 | —84 | Бесцветный газ | Взрывает от детонации |
| Бензальдегид | $\text{C}_6 \text{H}_5 \cdot \text{CHO}$ | 106,05 | 1,046 | —26 | 179 | Бесцветная жидкость | Запах миндаля |
| Бензил хлористый . | $\text{C}_6 \text{H}_5 \cdot \text{CH}_2 \text{Cl}$ | 126,52 | 1,103 | —39 | 179 | То же | Слезоточивый |
| Бензойная кислота . | $\text{C}_6 \text{H}_5 \cdot \text{COOH}$ | 122,05 | 1,266 | 121 | 249 | Белые пластинки | Выше 100 °C возгоняется |
| Бензол | $\text{C}_6 \text{H}_6$ | 78,05 | 0,879 | 6 | 80 | Бесцветная жидкость | Ядовит |
| Бензолсульфоновая кислота | $\text{C}_6 \text{H}_5 \cdot \text{SO}_3 \text{H} + \text{H}_2 \text{O}$ | 176,13 | — | 44 | 136 | Кристаллическое тело | |
| Бромбензол | $\text{C}_6 \text{H}_5 \cdot \text{Br}$ | 156,96 | 1,495 | —31 | 156 | Жидкость | Ядовит |
| Бутадиен-1,3 (дивинил) | $\text{CH}_2 = \text{CH} \cdot \text{CH} = \text{CH}_2$ | 54,05 | — | — | —5 | Бесцветный газ | |
| н-Бутан | $\text{C}_4 \text{H}_{10}$ | 58,08 | 0,600° | —135 | 1 | То же | |
| Бутиловый спирт норм. первичный . | $\text{C}_4 \text{H}_9 \text{OH}$ | 74,08 | 0,804 | —80 | 117 | Бесцветная жидкость | |
| Бутиловый спирт изо (см. Изобутиловый спирт) | | | | | | | |
| Бутиловый спирт вторичный | $\text{CH}_3 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{CHOH} \cdot \text{CH}_3$ | 74,08 | 0,808 | —89 | 100 | То же | |
| Бутиловый спирт третичный | $(\text{CH}_3)_3 \text{COH}$ | 74,08 | 0,789 | 25 | 83 | — | |
| Винная кислота d (обыкн.) | $\text{COOH} \cdot \text{CHOH} \cdot \text{CHOH} \cdot \text{COOH}$ | 150,05 | 1,760 | 170 | — | Прозрачные кристаллы | |
| Винная кислота l . . | $\text{COOH} \cdot \text{CHOH} \cdot \text{CHOH} \cdot \text{COOH}$ | 150,05 | 1,760 | 170 | — | То же | |
| Виноградный сахар . | $\text{C}_6 \text{H}_{12} \text{O}_6 + \text{H}_2 \text{O}$ | 198,11 | 1,56 | 82 | — | » » | Сладкий вкус |
| Гексан норм. | $\text{C}_6 \text{H}_{14}$ | 86,11 | 0,660 | —94 | 69 | Бесцветная жидкость | |
| Гептан норм. | $\text{C}_7 \text{H}_{16}$ | 100,13 | 0,730 | —91 | 98 | То же | |
| Гликоль | $\text{CH}_2 \text{OH} \cdot \text{CH}_2 \text{OH}$ | 62,05 | 1,109 | —12 | 197 | » » | То же |
| Глицерин | $\text{CH}_2 \text{OH} \cdot \text{CHOH} \cdot \text{CH}_2 \text{OH}$ | 92,06 | 1,260 | 19 | 290 | Бесцветная вязкая жидкость | » » |
| Глюкоза, или сахар виноградный . . . | $\text{C}_6 \text{H}_{12} \text{O}_6$ | 180,10 | 1,544 | 146 | — | Белые кристаллы | » » |
| Гремучая ртуть . . | $(\text{C} : \text{NO})_2 \text{Hg} (+ \frac{1}{2} \text{H}_2 \text{O})$ | 284,6 | 4,42 | — | — | — | Взрывает |
| Декалин | $\text{C}_{10} \text{H}_{18}$ | 138,14 | 0,877 | —125 | 188 | — | |
| Дивинил (см. Бутадиен-1,3) | — | | | | | | |
| Дифенил | $\text{C}_6 \text{H}_5 \cdot \text{C}_6 \text{H}_5$ | 154,08 | 1,16 | 70 | 255 | Бесцветные кристаллы | |

* Удельные веса жидкостей и твердых тел даны при +20°C в г/см³; для жидкостей, кипящих при температуре ниже +20°C, удельные веса даны при температурах кипения (760 мм рт. ст.).

Продолжение табл. 13

| Название | Формула | Молекулярный вес | Уд. вес | Температура | | Внешний вид | Характерные свойства |
|--------------------------------|--------------------------------------|------------------|--------------|--------------|------------------|---|-------------------------------------|
| | | | | плавления °C | кипения °C (760) | | |
| Дихлорбензол о | $C_6H_4Cl_2$ | 146,95 | 1,328 | -18 | 179 | Бесцветная жидкость | Ядовит |
| » м | $C_6H_4Cl_2$ | 14,695 | 1,282 | -24 | 173 | То же | » |
| » п | $C_6H_4Cl_2$ | 146,95 | 1,458 | 53 | 174 | Бесцветные кристаллы | » |
| Дихлорэтан | $CH_2Cl \cdot CH_2Cl$ | 98,95 | 1,261 | -35 | 84 | Бесцветная жидкость | Хороший растворитель, ядовит |
| Изоамидовый спирт | $(CH_3)_2CH \cdot CH_2 \cdot CH_2OH$ | 88,10 | 0,810 | — | 130 | То же | Ядовит |
| Изобутан | C_4H_{10} | 58,08 | — | — | -10 | Бесцветный газ | » |
| Изобутиловый спирт | $(CH_3)_2CH \cdot CH_2OH$ | 74,08 | 0,800 | -108 | 108 | Бесцветная жидкость | » |
| Изооктан | C_8H_{18} | 114,14 | — | — | — | То же | » |
| Индиго | $C_{16}H_8O_4(NH)_2$ | 262,10 | 1,35 | 390—392 | Возг. | Синие кристаллы | Краска |
| Изопропиловый спирт | $(CH_3)_2CHOH$ | 60,06 | 0,789 | -86 | 82 | Бесцветная жидкость | Ядовит |
| Иодоформ | CHI_3 | 393,77 | 4,008 | 119 | Возг. | Жёлтые кристаллы | Разлагается на свету |
| Иприт | $CH_2Cl-CH_2-S-CH_2-$ $-CH_2Cl$ | 126,97 | — | 14 | 217 | Жидкость | ОВ! |
| Камфара d | $C_{15}H_{14}O$ | 152,13 | 0,811 | 180 | 209 | Бесцветная вязкая кристаллическая масса | Возгоняется |
| Карболовая кислота (см. Фенол) | | | | | | | |
| Кетен | $CH_2 : CO$ | 42,02 | — | -151 | -56 | Бесцветный газ | » |
| Крахмал | $(C_6H_{10}O_5)_x$ | 162,09x | — | — | — | Белое порошкообразное тело | » |
| Крезол о | $CH_3 \cdot C_6H_4OH$ | 108,06 | 1,046 | 30 | 190 | Бесцветная жидкость | Ядовит |
| » м | $CH_3 \cdot C_6H_4OH$ | 108,06 | 1,035 | 4 | 201 | Бесцветная жидкость | » |
| » п | $CH_3 \cdot HC_6H_4OH$ | 108,06 | 1,031 | 37 | 200 | Бесцветная жидкость | » |
| Ксилол о | $C_6H_4(CH_3)_2$ | 106,08 | 0,863 | -27 | 141 | Бесцветная жидкость | » |
| » м | $C_6H_4(CH_3)_2$ | 106,08 | 0,862 | -54 | 139 | Бесцветная жидкость | » |
| » п | $C_6H_4(CH_3)_2$ | 106,08 | 0,861 | 15 | 136 | Бесцветная жидкость | » |
| Лимонная кислота | $C_6H_8(OH)(COOH)_3 + H_2O$ | 210,08 | 1,542 | 153 | Разл. | Бесцветные кристаллы | Запах прогорклого масла |
| Масляная кислота | $CH_3 \cdot CH_2CH_2 \cdot COOH$ | 88,06 | 0,964 | -8 | 162 | Бесцветная жидкость | » |
| Меркаптан (см. Этилмеркаптан) | | | | | | | |
| Метан | CH_4 | 16,03 | 0,415 | -184 | -161,4 | Бесцветный газ | Ядовит |
| Метиламин | CH_3NH_2 | 31,05 | 0,696 | Менее -79 | -6 | То же | » |
| Метил бромистый . . | CH_3Br | 94,94 | 1,732 | — | 4,5 | » » | Ядовит |
| Метил иодистый . . | CH_3I | 141,94 | 2,279 | -66 | 43 | Бесцветная жидкость | » |
| Метилен хлористый . | CH_2Cl_2 | 84,94 | 1,336 | -97 | 42 | То же | » |
| Метиловый спирт . . | CH_3OH | 32,03 | 0,790 | -98 | 65 | » » | Ядовит, отравление вызывает слепоту |
| Метил хлористый . . | CH_3Cl | 50,48 | 0,552 | -92 | -24 | » » | Ядовит |
| Молочная кислота | $CH_3CH(OH) \cdot COOH$ | 90,05 | 1,240 | 18 | 122/15 мм | Бесцветная кристаллическая масса | Ядовит |
| Мочевина | $NH_2 \cdot CO \cdot NH_2$ | 60,05 | 1,335 | 133 | — | Бесцветные кристаллы | Резкий кислотный запах |
| Муравьиная кислота | $HCOOH$ | 46,02 | 1,220 | 8 | 101 | Бесцветная жидкость | » |
| Муравьиный альдегид | $HCHO$ | 30,02 | (-20*) 0,815 | -92 | -21 | Бесцветный газ | Летуч |
| Нафталин | $C_{10}H_8$ | 128,06 | 1,145 | 80 | 218 | Бесцветные блестящие листочки | Неприятный запах |
| Нафтила мин-α | $C_{10}H_7NH_2$ | 143,08 | 1,171 | 50 | 301 | Бесцветные кристаллы | Ядовит, запах миндаля |
| Нафтиламин-β | $C_{10}H_7NH_2$ | 143,08 | 1,216 | 112 | 306 | То же | » |
| Нитробензол | $C_6H_5NO_2$ | 123,05 | 1,203 | 9 | 211 | Жидкость слабожелтого цвета | » |
| Нитроглицерин | $C_3H_5(ONO_2)_3$ | 227,06 | 1,596 | 13 | 257 | Маслообразная тяжелая жидкость | Взрывает, ядовит |

Продолжение табл. 13

| Название | Формула | Молекулярный вес | Уд. вес | Температура | | Внешний вид | Характерные свойства |
|---|---|------------------|----------------|--------------|------------------|---|-------------------------------------|
| | | | | плавления °C | кипения °C (760) | | |
| Нитрометан | $\text{CH}_3 \text{NO}_2$ | 61,03 | 1,139 | -29 | 102 | Бесцветная жидкость | |
| Олеиновая кислота | $\text{C}_{17} \text{H}_{33} \text{COOH}$ | 282,27 | 0,898 | 14 | 233/15 мм | Бесцветная маслянистая жидкость | |
| Пальмитиновая кислота | $\text{C}_{16} \text{H}_{31} \text{COOH}$ | 256,26 | 0,853 (62°C) | 62 | 215/15 мм | Бесцветная кристаллическая масса | |
| Пентан норм | $\text{C}_5 \text{H}_{12}$ | 72,10 | 0,626 | -131 | 36 | Бесцветная жидкость | |
| Пикриновая кислота-1, 2, 4, 6 | $\text{HO} \cdot \text{C}_6 \text{H}_2 (\text{NO}_2)_3$ | 229,05 | 1,767 | 122 | — | Желтые листочки | Взрывает |
| Пинен | $\text{C}_{10} \text{H}_{16}$ | 136,13 | 0,858 | — | 156 | Бесцветная жидкость | Запах скипидара |
| Пиридин | $\text{C}_5 \text{H}_5 \text{N}$ | 79,05 | 0,981 | -42 | 116 | Жидкость | |
| Пирогаллол-1,2,3 | $\text{C}_6 \text{H}_3 (\text{OH})_3$ | 126,05 | 1,453 | 132 | 293 | Темнозеленые кристаллы | |
| Пиррон | $\text{C}_4 \text{H}_4 : \text{NH}$ | 67,05 | 0,948 | — | 131 | Бесцветная жидкость, темнеет на воздухе | |
| Пропан | $\text{C}_3 \text{H}_8$ | 44,06 | — | -190 | -45 | Бесцветный газ | |
| Пропилен | $\text{CH}_3 \cdot \text{CH} : \text{CH}_2$ | 42,05 | — | — | -50 | То же | |
| Пропиловый спирт | $\text{CH}_3 \cdot \text{CH}_2 \text{CH}_2 \text{OH}$ | 60,06 | 0,804 | -127 | 97 | Бесцветная жидкость | |
| Сахар виноградный (см. Глюкоза) | | | | | | | |
| Сахар тростниковый (см. Тростниковый сахар) | | | | | | | |
| Сахар фруктовый (см. Фруктовый сахар) | | | | | | | |
| Сахарин (о-бензойной кислоты сульфамид) | $\text{C}_6 \text{H}_4 \text{O}_2 : \text{NH}_2$ | 183,12 | — | 223 | — | Бесцветные кристаллы | Сладкий вкус |
| Свинец-тетраэтил (см. Тетраэтил-свинец) | | | | | | | |
| Сероуглерод | CS_2 | 76,14 | 1,262 | -112 | 46 | Бесцветная жидкость | Ядовит, самовоспламеняется |
| Скипидар (см. Пинен) | | | | | | | |
| Стеариновая кислота | $\text{C}_{17} \text{H}_{35} \text{COOH}$ | 284,29 | 0,941 | 69 | 232/15 мм | Бесцветная кристаллическая масса | |
| Стирол | $\text{C}_6 \text{H}_5 \cdot \text{CH} : \text{CH}_2$ | 104,06 | 0,907 | — | 145 | Бесцветная жидкость | |
| Сульфаниловая кислота | $\text{NH}_2 \cdot \text{C}_6 \text{H}_4 \cdot \text{SO}_3 \text{OH} + 2 \text{H}_2 \text{O}$ | 209,17 | — | 288 | — | Бесцветные кристаллы | Разлагается при высокой температуре |
| Тетралин, или тетрагидронафталин | $\text{C}_{10} \text{H}_{12}$ | 132,10 | 0,971 | Менее -20 | 205—207 | Бесцветная жидкость | |
| Тетраэтилсвинец | $\text{Pb} (\text{C}_2 \text{H}_5)_4$ | 323,4 | 1,62 | — | 91/19 мм | То же | Ядовит |
| Тиофен | $\text{C}_4 \text{H}_4 : \text{S}$ | 84,10 | 1,066 | -30 | 84 | » » | » |
| Толуол | $\text{C}_6 \text{H}_5 \cdot \text{CH}_3$ | 92,06 | 0,867 | -5 | 111 | » » | » |
| Триметиламин | $(\text{CH}_3)_3 : \text{N}$ | 59,08 | 0,673 | Менее -75 | Около -3 | Бесцветный газ | Запах селедочного раствора |
| Триметилен | $\text{C}_3 \text{H}_6$ | 42,05 | 0,720 при -79° | — | — | То же | |
| Тринитротолуол (тротил)-2,4,6,1 α | $(\text{NO}_2)_3 \text{C}_6 \text{H}_2 \cdot \text{CH}_3$ | 227,06 | — | 81 | — | | Взрывает |
| Тринитротолуол (тротил)-2,3,4,1 β | $(\text{NO}_2)_3 \text{C}_6 \text{H}_2 \cdot \text{CH}_3$ | 227,06 | — | 112 | — | | |
| Тринитротолуол (тротил)-2,4,5,1 γ | $(\text{NO}_2)_3 \text{C}_6 \text{H}_2 \cdot \text{CH}_3$ | 227,06 | — | 104 | — | | |
| Тринитрофенол-3,4,6,1 | $(\text{NO}_2)_3 \text{C}_6 \text{H}_2 \cdot \text{OH}$ | 229,05 | — | 96 | — | | |
| Тринитрофенол-2,3,6,1 | $(\text{NO}_2)_3 \text{C}_6 \text{H}_2 \cdot \text{OH}$ | 229,05 | — | 117 | — | | |
| Тростниковый сахар | $\text{C}_{12} \text{H}_{22} \text{O}_{11}$ | 342,18 | 1,588 | ~160 | — | Бесцветные кристаллы | Сладкий вкус |
| Уксусная кислота (ледяная уксусная кислота) | $\text{CH}_3 \text{COOH}$ | 60,03 | 1,049 | 17 | 118 | Бесцветная жидкость | Резкий кислотный запах |
| Уксусноизоамиловый эфир | $\text{CH}_3 \text{COOC}_5 \text{H}_{11}$ | 130,11 | 0,874 | — | 137—145 | То же | Разлагается |

Продолжение табл. 13

| Название | Формула | Молекулярный вес | Уд. вес | Температура | | Внешний вид | Характерные свойства |
|---|-------------------------------------|------------------|----------------|--------------------|------------------|----------------------|------------------------------|
| | | | | плавления °C | кипения °C (760) | | |
| Уксусноэтиловый эфир | $C_4H_8O_2$ | 88,06 | 0,901 | -83 | 77 | Бесцветная жидкость | Приятный фруктовый запах |
| Уксусный альдегид | CH_3CHO | 44,03 | 0,783 | -123 | 20 | То же | Резкий удушающий запах |
| Уксусный ангидрид | $(CH_3CO)_2O$ | 102,05 | 1,082 | — | 140 | » » | Медленно разлагается |
| Фенантрен | $C_{14}H_{10}$ | 178,08 | 1,063 при 100° | 100 | 340 | Блестящие листочки | Выше 96°C возгорается |
| Фенол, или карболовая кислота | C_6H_5OH | 94,05 | 1,058 при 60° | 42,5 | 182 | | Ядовит |
| Формальдегид (см. Муравьиный альдегид) | | | | | | | |
| Фосген | $COCl_2$ | 98,92 | 1,42 | -118 | 8 | Газ | ОВ! |
| Фруктовый сахар | $CH_2OH(CHOH)_4COCH_2OH$ | 180,10 | 1,669 | 95 | — | Бесцветные кристаллы | Сладкий вкус |
| Фуран | C_4H_4O | 68,03 | 0,944 | — | 32 | Бесцветная жидкость | |
| Фурфурол | $C_4H_4O \cdot CHO$ | 96,03 | 1,159 | -31 | 162 | То же | Запах свежего ржаного хлеба |
| Хингидрон | $C_8H_8O \cdot C_8H_8(OH)_2$ | 218,08 | 1,401 | 171 | Возгон. | Тёмнозелёные иглы | Ядовит |
| Хинин | $C_{20}H_{24}O_8N_2 \cdot (+3H_2O)$ | 324,21 | — | 57 | — | | |
| Хлорбензол | C_6H_5Cl | 112,50 | 1,106 | -45 | 132 | Бесцветная жидкость | » |
| Хлороформ | $CHCl_3$ | 119,39 | 1,488 | -63 | 61 | То же | Сладковатый запах |
| Хлортолуол о | $Cl \cdot C_6H_4 \cdot CH_3$ | 126,52 | 1,081 | -34 | 159 | » » | Ядовит |
| » м | $Cl \cdot C_6H_4 \cdot CH_3$ | 126,52 | 1,072 | -48 | 162 | » » | » |
| » п | $Cl \cdot C_6H_4 \cdot CH_3$ | 126,52 | 1,069 | 7 | 162 | То же | » |
| Целлюлоза | $(C_6H_{10}O_5)_x$ | 162,08 · x | 1,525 | — | — | Белый волокн. | |
| Циклобутан | C_4H_8 | 56,06 | 0,704 | <-80 | 12 | Бесцветный газ | |
| Циклогексан | C_6H_{12} | 84,10 | 0,778 | 8 | 81 | Бесцветная жидкость | |
| Циклопентан | C_5H_{10} | 70,08 | 0,754 | Менее -80 | 51 | То же | |
| Четырёххлористый углерод | CCl_4 | 153,84 | 1,594 | -23 | 77 | Бесцветная жидкость | Ядовит, хороший растворитель |
| Щавелевая кислота | $COOH \cdot COOH + 2H_2O$ | 126,05 | 1,653 | 189 безводной -172 | Возгон. | Бесцветные кристаллы | Ядовита |
| Этан | C_2H_6 | 30,05 | — | — | -93 | Бесцветный газ | |
| Этиламин | $C_2H_5 \cdot NH_2$ | 45,06 | 0,708 | -81 | 11 | То же | |
| Этилен | C_2H_4 | 28,03 | — | -169 | -102 | » » | |
| Этилмеркаптан | $C_2H_5 \cdot SH$ | 62,12 | 0,839 | -114 | 37 | Бесцветная жидкость | Неприятный запах |
| Этилен хлористый (см. Дихлорэтан) | | | | | | | |
| Этиловый спирт | C_2H_5OH | 46,05 | 0,806 | -114,15 | 78 | То же | |
| Этил хлористый | C_2H_5Cl | 64,50 | 0,921 | -139 | 13 | » » | Ядовит |

Тиофен C_4H_4S — бесцветная жидкость, кипящая при температуре 84°C, не растворимая в воде, содержится в небольших количествах в каменноугольном бензоле и в нефтях Второго Баку.

Примером шестичленного гетероцикла, содержащего один гетероатом, может служить пиридин C_5H_5N — бесцветная жид-

кость с температурой кипения 115°C, входит вместе с гомологами в состав каменноугольной смолы. Является слабым основанием, с водой смешивается во всех отношениях. Смесь пиридина и его гомологов, называемая сырыми пиридиновыми основаниями, применяется как растворитель, а также для денатурации спирта.

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ

Идеальные газы

Идеальным газом называется газ, строго подчиняющийся законам Бойля-Мариотта, Шарля-Гей-Люссака (и Джоуля). Идеальный газ — физическая абстракция. К идеальным газам приближаются реальные газы при низких давлениях и высоких температурах.

Уравнения состояния идеального газа — уравнение Клапейрона. Уравнение состояния даёт связь между давлением идеального газа P , его объёмом v и температурой T .

Для одной грамма молекулы идеального газа оно имеет вид:

$$Pv = RT,$$

где R — универсальная газовая постоянная, одинаковая для всех газов;

P — давление;

v — объём одной грамма молекулы;

T — абсолютная температура.

Для n грамма молекулы идеального газа

$$PV = nRT, \text{ или } PV = \frac{m}{M} RT,$$

где m — масса газа в г;

M — молекулярный вес газа.

Последнее выражение используется для определения молекулярного веса вещества по известным значениям давления, объёма, температуры и массы газа или пара вещества.

Универсальная газовая постоянная. Универсальная газовая постоянная R одинакова для всех газов и имеет размерность энергии, делённой на температуру. Численное значение R приведено ниже.

$$\begin{aligned} R &= 8,31 \cdot 10^7 \text{ эрг/моль}^\circ\text{C} = \\ &= 8,315 \text{ джоуль/моль}^\circ\text{C} = \\ &= 1,986 \text{ кал/моль}^\circ\text{C} = \\ &= 0,08206 \text{ литр атм./моль}^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Реальные газы

Уклонения реальных газов от законов идеальных газов. При увеличении давления и уменьшении температуры реальные газы уклоняются от законов идеальных газов, так как при этом начинают заметно сказываться силы притяжения между молекулами. Реальные газы в отличие от идеальных сжимаются.

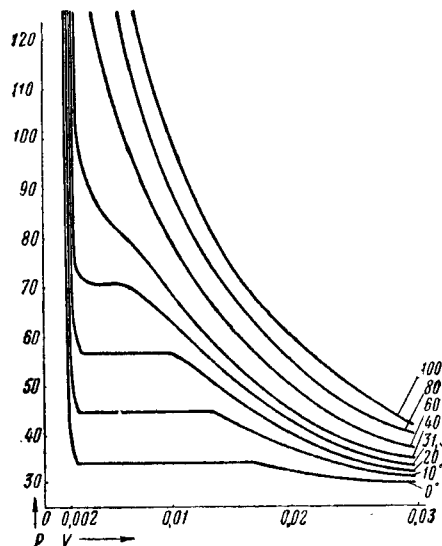
В уравнении Ван-дер-Ваальса учтены поправки на силы притяжения между молекулами и объём молекул. Для одной грамма молекулы это уравнение имеет вид:

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT,$$

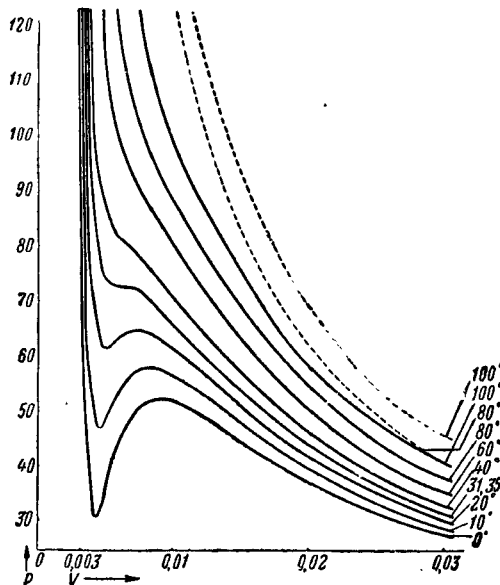
где a — константа, характеризующая молекулярное притяжение и измеряющаяся в единицах давления, умноженных на единицу объёма в квадрате;

b — константа, равная учетверённому собственному объёму молекул, содержащихся в одной грамма молекулы газа.

Это уравнение удовлетворительно характеризует свойства реальных газов лишь при невысоких давлениях. На фиг. 1 изобра-



Фиг. 1 Кривые уравнения Ван-дер-Ваальса (изотермы)



Фиг. 2. Изотермы углекислоты

жены кривые уравнения Ван-дер-Ваальса в координатах P и v для разных температур T (изотермы). На фиг. 2 в тех же координатах даны действительные кривые зависимости P от v при разных T для CO_2 .

Уравнение качественно приложимо и к жидкостям.

Уравнение Бертло. Уравнение состояния реальных газов. Для одной граммолекулы оно имеет вид:

$$\left(P + \frac{a'}{v^2T}\right)(v - b) = RT,$$

где a' — константа молекулярного притяжения.

Уравнение Бертло учитывает температурный ход константы a Ван-дер-Ваальса.

Критическое состояние и связь критических величин с константами Ван-дер-Ваальса. Д. И. Менделеев открыл, что для каждого газа существует температура, выше которой этот газ ни при каком давлении не может быть сжижен. Эта температура называется критической и обозначается T_k . В семействе изотерм реального газа она отвечает изотерме с точкой перегиба, в которой кривая проходит горизонтально. Сама точка и состояние вещества, отвечающее этой точке, называются критическими.

Давление газа и удельный объём его в этом состоянии также называются критическими и обозначаются соответственно P_k и v_k .

Между критическими величинами и константами Ван-дер-Ваальса существуют следующие зависимости:

$$T_k = \frac{8a}{27bR}; \quad P_k = \frac{a}{27b^2}; \quad v_k = 3b;$$

или

$$R = \frac{8}{3} \frac{P_k v_k}{T_k}; \quad a = 3P_k v_k^2;$$

$$b = \frac{v_k}{3};$$

a и b — константы Ван-дер-Ваальса.

Эти соотношения дают возможность по экспериментально определяемым критическим величинам вычислять константы Ван-дер-Ваальса.

Уравнение соответственных состояний. Так называются уравнения, получающиеся введением в уравнение состояний вместо обычных давления, объёма и температуры приведённых величин давления $\pi = \frac{P}{P_k}$, объёма

$$\varphi = \frac{V}{V_k} \text{ и температуры } \vartheta = \frac{T}{T_k}.$$

Приведённое уравнение Ван-дер-Ваальса имеет вид:

$$\left(\pi + \frac{3}{\varphi^2}\right)(3\varphi - 1) = 8\vartheta.$$

Оно не содержит констант, зависящих от природы вещества, и является поэтому универсальным. Однако оно, как и исходное уравнение, является приближённым, в особенности в области высоких давлений, и совершенно непригодно для веществ, молекулы которых содержат группы OH, COOH, CO и др.

Твёрдые тела

Кристаллическое и аморфное состояние твёрдых тел. Твёрдые тела встречаются в двух состояниях: кристаллическом и аморфном. Кристаллическое состояние твёрдого тела характеризуется правильным расположением молекул атомов или ионов в пространстве (кристаллическая решётка), существованием определённой температуры плавления и скачкообразным изменением многих свойств при плавлении. Аморфное состояние характеризуется хаотическим расположением молекул, существованием температурного интервала размягчения и непрерывного хотя и резкого изменения всех физических свойств в интервале размягчения. Большинство веществ встречается в обоих твёрдых состояниях. Однако есть вещества, существующие только в кристаллическом или только в аморфном состоянии.

Кристаллические системы. Кристаллографией — наукой о геометрических формах кристаллов и связи их (форм) с внутренней структурой кристаллов — установлено существование 32 кристаллических классов (Е. С. Фёдоров), которые сводятся к 6 кристаллическим системам, отличающимся различной степенью симметрии:

| | |
|--------------------|---------|
| 1) правильная | система |
| 2) квадратная | » |
| 3) гексагональная | » |
| 4) ромбическая | » |
| 5) моноклиническая | » |
| 6) триклиническая | » |

Рентгенографическое и электронографическое исследование кристаллов. Современное исследование внутренней структуры кристаллов основано на явлении дифракции рентгеновских или электронных лучей пространственной кристаллической решётки, играющей роль дифракционной решётки. Дифракционная картина либо фотографируется, либо изучается при помощи ионизационной камеры. Анализ дифракционной картины основан на соотношении русского учёного Г. В. Вульфа

$$n\lambda = 2d \sin \alpha,$$

где λ — длина волны монохроматического рентгеновского луча или длина фазовой волны электронов;

α — угол между лучом и совокупностью параллельных отражающих плоскостей кристаллической решётки, при котором получается наиболее интенсивное отражение луча;

d — расстояние между параллельными отражающими плоскостями кристаллической решётки;

n — целое число.

Если известны два значения α для одной и той же λ и одной и той же совокупности параллельных плоскостей кристаллической решётки, то d определяется решением системы двух уравнений с двумя неизвестными:

$$n_1 \lambda = 2d \sin \alpha_1;$$

$$n_2 \lambda = 2d \sin \alpha_2.$$

По найденным основным значениям d устанавливается внутренняя структура кристалла.

В настоящее время пользуются тремя методами рентгенографического исследования кристаллов.

В первом методе (наиболее старый) используется пучок неоднородных рентгеновских лучей. Исследуемый кристалл находится в покое.

Во втором методе используется монохроматический пучок рентгеновских лучей. В этом методе либо кристалл вращается вокруг одной оси, либо рентгеновский луч вращается вокруг неподвижного кристалла.

В третьем методе используется также монохроматический рентгеновский луч, но вращающийся кристалл заменяется неподвижным кристаллическим порошком, в котором практически осуществляются все возможные расположения микрокристалла. Аналогичные принципы положены в основу методов электронографического анализа. Последний, однако, в силу малой проникаемости электронных лучей в кристаллы нашёл широкое применение для исследования поверхностных слоёв и фольг.

Решётки металлов. Решётки металлов образованы преимущественно положительными ионами металла, между которыми свободно движутся связывающие их электроны. Наличие свободных электронов или так называемого электронного газа определяет хорошую электропроводность металлов и ряд других специфических свойств. Металлы кристаллизуются в кубической (Al, Cu, Ag, Au, Ni, γ -Fe, α -Fe, Pb, Pt, V, Cr, W, Na, K, Rb, Cs и др.) и гексагональной (Be, Mg, Zn, Cd, Ti и др.) системах. Сплавы металлов либо сохраняют решётку компонента, преобладающего количественно, либо образуют свою отличную структуру.

Решётки неорганических соединений. Большинство неорганических соединений, солей, окислов и др. имеют ионные решётки и переходные типы решёток от ионных к молекулярным. Ионные решётки образованы правильным чередованием положительных и отрицательных ионов. Значительные электрические силы, действующие между ионами, обуславливают прочность кристаллов с ионной решёткой. Этим же объясняются высокие температуры плавления, ничтожная упругость паров и ряд других свойств неорганических соединений. Простые неорганические соединения кристаллизуются в кубической (NaCl, AgCl, ZnS, AlN и др.), квадратной (TiO₂ и др.) и гексагональной (ZnO, CdS и др.) системах. Сложные неорганические соединения кристаллизуются в менее симметричных системах — ромбической, моноклинической и триклинической.

Решётки органических соединений. Для органических соединений типичной является молекулярная решётка, образованная из правильных рядов определённым образом ориентированных молекул. Связь между молекулами осуществляется силами Ван-дер-Ваальса. Этим обуславливаются сравнительно небольшая прочность кристаллов органических веществ, низкие температуры плавления и большая летучесть их. Благодаря сложности строения молекул органические соединения кристаллизуются чаще

в гексагональной, ромбической и моноклинической системах.

Полиморфизм. Полиморфизмом называется способность вещества существовать в двух и более кристаллических формах (модификациях), отличающихся друг от друга кристаллическими решётками, механическими, физико-химическими и термодинамическими свойствами. Каждая кристаллическая форма устойчива в определённой области температур и давлений. Вне этой области она неустойчива (метастабильна) и с большей или меньшей скоростью превращается в другую более устойчивую форму. Так, например, ниже 910° С устойчиво α -железо (гексагональная система), выше 910° γ -железо (кубическая система). Закалка железа заключается в том, что γ -железо при быстром охлаждении сохраняется в неустойчивом состоянии чрезвычайно долго благодаря незначительной скорости превращения в α -железо. Нагревание ускоряет это превращение (отпуск металла). При температуре 910° С устойчивы обе модификации.

Полиморфизм простых веществ называется аллотропией.

Изоморфизм. Изоморфными называются два или более вещества, кристаллизующиеся при одинаковых условиях в одинаковых кристаллических формах и способные достраивать решётку друг друга.

Такие вещества обычно сходны по химическому составу, например CaCO₃, MgCO₃, MnCO₃, ZnCO₃ и CoCO₃ изоморфны и кристаллизуются в триклинической системе.

Теплоёмкость твёрдых тел. Теплоёмкость твёрдых тел в отличие от теплоёмкости жидких и газообразных тел сильно зависит от температуры, в особенности в области низких температур. Фиг. 3 изображает типичные кривые $C_v = f(T)$. В области, близкой к абсолютному нулю, кривые могут быть описаны уравнением

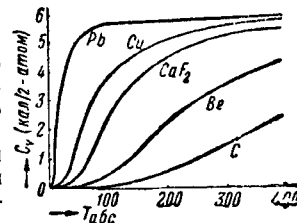
$$C_v = 465 \frac{T^3}{\theta^3},$$

где C_v — теплоёмкость твёрдого тела при постоянном объёме в $\frac{\text{кал}}{\text{град. г. атом}}$;

θ — характеристическая температура, зависящая от природы тела.

При высоких температурах теплоёмкость твёрдого тела при постоянном объёме C_v асимптотически приближается к постоянной величине. Теплоёмкость при постоянном давлении C_p несколько выше и непрерывно растёт с увеличением температуры.

Атомные теплоёмкости простых веществ в твёрдом состоянии при комнатной температуре и постоянном давлении приблизительно одинаковы и в среднем равны, 6,2 кал/град. Атомной теплоёмкостью назы-



Фиг. 3. Зав. атомной теплоёмкости с температурой

вается произведение удельной теплоёмкости на атомный вес. Исключение из правила составляют некоторые лёгкие элементы, для которых в области комнатной температуры ещё сильна зависимость от температуры (см. Теплоёмкость твёрдых тел, стр. 317), например алмаз (1,35), графит (1,92), кремний (4,84). Молекулярная теплоёмкость сложного вещества в твёрдом состоянии равна сумме атомных теплоёмкостей элементов, содержащихся в нём:

$$C_p = n \cdot 6,2,$$

где C_p — молекулярная теплоёмкость твёрдого тела при постоянном давлении;

n — число атомов, составляющих молекулу твёрдого тела;

6,2 — атомная теплоёмкость твёрдого тела при постоянном давлении.

Квантовая теория теплоёмкости. Квантовая теория теплоёмкости, накладывающая условия квантования колебательной энергии элементов кристаллической решётки, объясняет температурную зависимость теплоёмкости твёрдых тел и даёт ряд соотношений, хорошо совпадающих с опытом. Наиболее важными являются формула Дебая и формула Эйнштейна для теплоёмкости простого твёрдого тела при постоянном объёме:

$$C_v = 3R \left(\frac{\theta}{T} \right)^2 \frac{e^{\frac{\theta}{T}}}{\left(e^{\frac{\theta}{T}} - 1 \right)^2} =$$

$$= 3R \left(\frac{h \omega}{kT} \right)^2 \frac{e^{\frac{h \omega}{kT}}}{e^{\frac{h \omega}{kT}} - 1},$$

где h — постоянная Планка;

k — постоянная Больцмана;

ω — частота собственных колебаний атомов;

e — основание натуральных логарифмов.

Недостатком формулы Эйнштейна является то, что она предполагает существование в твёрдом теле только одной частоты собственных колебаний, поэтому плохо оправдывается в области низких температур.

Для перехода к теплоёмкости при постоянном давлении существуют эмпирические формулы, из которых приведём формулу

$$C_p = C_v \left(1 + 0,0214 C_v \frac{T}{T_{пл}} \right),$$

где $T_{пл}$ — абсолютная температура плавления.

СТРОЕНИЕ АТОМА

Электрон

Электрон — носитель элементарного (наименьшего наблюдаемого в свободном виде) количества отрицательного электричества, составная часть атомов вещества. Электроны могут быть получены из любого вида веще-

ства независимо от его физического и химического состояния. Законы электролиза являются одним из важнейших оснований для допущения атомной структуры электричества. Согласно законам Фарадея при прохождении через электролиты одного и того же количества электричества на электродах выделяется одно и то же число атомов одновалентного вещества, вдвое меньшее количество атомов двухвалентного вещества и т. д. Таким образом, электричество связано с атомами вещества в виде дискретных порций, кратных заряду одновалентного иона. Электроны в свободном виде испускаются при радиоактивном распаде атомов, из накаливаемых металлов, вырываются из вещества под действием света (фотоэффект) или сильного электрического поля и т. п.

Определение заряда электрона. Прямое доказательство дискретности электрических зарядов и первые точные определения величины заряда электрона путём нахождения зарядов отдельных частиц были выполнены Р. А. Милликеном и А. Ф. Иоффе. Опыты, поставленные Милликеном, заключались в следующем. Между двумя горизонтальными металлическими пластинами, которые могут быть заряжены, получают туман, состоящий из мелких масляных капель. Он освещается сбоку ярким светом и рассматривается в микроскоп, увеличение которого так подобрано, что можно удобно следить за отдельной каплей масла. Под действием силы тяжести капли опускаются вниз. Если осветить туман сбоку на короткое время рентгеновскими лучами, то воздух между пластинами ионизируется, и капельки тумана получают электрические заряды. Если теперь сообщить металлическим пластинам электрическую разность потенциалов так, чтобы электрическая сила действовала в противоположном направлении, чем сила тяжести, то капельки начинают двигаться вверх. Если продолжительное время следить за одной и той же каплей, то её скорость время от времени внезапно меняется, что связано с изменением её заряда. Скорость изменяется не непрерывно, а скачками. Отсюда можно заключить, что и заряд меняется скачками. Из этих опытов легко вычислить величину наименьшего (элементарного) заряда. Для заряда электрона получается величина

$$e = 4,80 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE} =$$

$$= 1,60 \cdot 2 \cdot 10^{-20} \text{ CGSM}.$$

При помощи этой величины легко определить число атомов в граммоате элемента или число молекул в граммолекулярном количестве вещества — авогадрово число N . Один граммэквивалент любого электролита несёт заряд $F = 96\,487$ кулонов. Но так как заряд одновалентного иона равен заряду электрона e , то авогадрово число

$$N = \frac{F}{e} = \frac{96\,487 \cdot 0,1}{1,60 \cdot 2 \cdot 10^{-20}} = 6,023 \cdot 10^{23}.$$

Отклонение электронов в электрическом поле. Если электрическое поле направлено перпендикулярно первоначальному пути электрона, то траектория электронов изме-

няются: они начинают описывать параболы подобно снаряду под действием силы тяжести. Величина отклонения электронов по линии, перпендикулярной первоначальному пути электронов, y определяется следующим равенством:

$$y = \frac{e}{2m_0 v_0^2} E x^2,$$

где e — заряд;
 m_0 — масса;
 v_0 — скорость электрона;
 E — напряжение электрического поля;
 x — путь, проходимый электроном в электрическом поле.

Отклонение электронов в магнитном поле. Магнитное поле, силовые линии которого направлены перпендикулярно направлению движения электронов, вызывает появление силы в направлении, перпендикулярном как магнитному полю, так и направлению электрона в каждый данный момент. Поэтому электрон в таком поле движется по кругу радиуса $r = \frac{m_0 v_0}{eH}$, где H — напряжение магнитного поля.

Удельный заряд электрона. Комбинируя методы электрического и магнитного отклонений при параллельном направлении их силовых линий, можно определить $\frac{e}{m_0}$ — отношение заряда электрона к его массе (удельный заряд электрона) и его скорость v_0 :

$$\frac{e}{m_0} = \frac{Ex^2}{2H^2 y r^2}; \quad v_0 = \frac{Ex^2}{2H y r}.$$

Измерения показали, что $\frac{e}{m_0}$ одинаково для всех электронов независимо от способа их получения и соответствует $5,273 \cdot 10^{17}$ CGSE $^{-1}$.

Зависимость массы от скорости. Приведённое значение удельного заряда относится к электрону, скорость которого мала по сравнению со скоростью света. Опыт показывает, что значение удельного заряда зависит от скорости электрона. По теории относительности масса любого тела зависит от скорости его движения. Эта зависимость выражается формулой

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

где m — масса движущегося тела;
 m_0 — масса покоящегося тела;
 v — скорость его движения;
 c — скорость света.

$$\beta = \frac{v}{c}.$$

Из формулы видно, что скорость света является пределом поступательных скоростей, так как при $\beta = c$, $m = \infty$, т. е. масса тела при его скорости, равной скорости света, становится бесконечно большой. При очень больших скоростях удельный заряд

электрона вследствие возрастания его массы падает.

Электромагнитная масса. Наличие у материальной частицы электрического заряда приводит к увеличению её инерции, так как работа внешней силы затрачивается при движении такой частицы не только на приращение её кинетической энергии, но и на создание магнитного поля. Поэтому электрон кроме «механической» должен обладать и «электромагнитной» массой. «Электромагнитная масса» покоя электрона равна

$$m_0 = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^2 r},$$

где c — скорость света;
 e и r — заряд и радиус электрона.

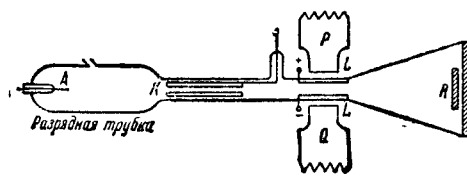
Если считать, что электрон обладает только электромагнитной массой, то можно из предыдущего соотношения определить его радиус:

$$r = \frac{2}{3} \frac{e^2}{m_0 c^2} = 1,87 \cdot 10^{-13} \text{ см.}$$

Электрон-вольт. В атомной физике энергию очень часто выражают в электрон-вольтах. Один электрон-вольт есть та энергия, которую приобретает электрон, пробегая ускоряющую разность потенциалов в 1 вольт; $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$. Энергия в 1 eV , рассчитанная на $N = 6,023 \cdot 10^{23}$ электронов, равна: $\text{eV моль}^{-1} = 9,64 \cdot 10^{11} \text{ эрг} \cdot \text{моль}^{-1} = 2,305 \cdot 10^4 \text{ кал} \cdot \text{моль}^{-1} = 23,05 \text{ ккал} \cdot \text{моль}^{-1}$. Миллион электронов-вольт обозначается MeV.

Положительные ионы

Метод парабол. Масса положительно заряженных ионов может быть найдена из определения отклонения положительных ионов в электрическом и магнитном поле. Из каждого вида атомов и молекул, способных обращаться в газ, можно получить поток положительно заряженных частиц (ионов). Для этого изучаемое вещество вводится в виде летучего соединения под низким давлением в разрядную трубку АК (фиг. 4), катод которой состоит из массив-

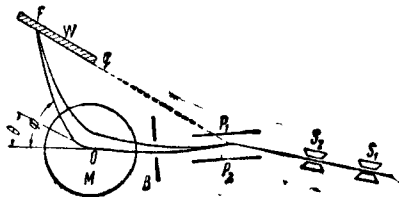


Фиг. 4. Установка для определения удельного заряда положительных ионов

ного цилиндра с отверстием посредине. Когда через трубку проходят электрические разряды, то газ частично ионизируется. Образующиеся положительные ионы движутся по направлению к катоду K , и небольшая часть их проходит через особое отверстие катода в виде тонкого (ионного пучка). Электрическим полем (между LL) и магнитным полем (магнит PQ)

луч отклоняется и попадает на фотографическую пластинку R . Так как первоначальные скорости v_0 отдельных положительных частиц различны, то под влиянием электрического и магнитного полей в месте падения их на пластинку получается не резко очерченная точка, а целая кривая, представляющая для всех частиц с одинаковым удельным зарядом параболу. Из полученных таким образом парабол можно, зная заряд частиц, рассчитать их массу.

Масс-спектрограф. В дальнейшем этот метод был усовершенствован путём фокусировки пятна, происходящего от частиц одинаковой природы, т. е. имеющих одинаковое $\frac{e}{m}$, но различные скорости v . Фокусировка в масс-спектрографе схематически изображена на фиг. 5. Электрические и маг-



Фиг. 5. Схема масс-спектрографа

нитные поля в масс-спектрографе расположены не параллельно, как в методе парабол, а перпендикулярно. Первое действует между пластинками P_1P_2 , тогда как силовые линии магнитного поля, расположенного внутри окружности O , перпендикулярны плоскости чертежа. Пучок ионов, пройдя диафрагмы S_1 и S_2 , отклоняется сначала электрическим полем P_1P_2 и частично, как это показано на фигуре, расщепляется вследствие различных первоначальных скоростей ионов. Далее этот расщепленный луч проходит магнитное поле M , которое вновь собирает однородные частицы в одну точку F независимо от их скорости. Если одновременно присутствуют частицы различной природы, различающиеся по удельному заряду, то получается соответствующее количество фокусов, лежащих на кривой FG , вдоль которых и располагается фотографическая пластинка. При помощи этого прибора можно очень точно определить массу ионов. Оказалось, что масса положительных ионов всегда равна массе отдельных атомов или групп атомов (радикалов).

Протон. Положительно заряженный ион водорода H^+ получил название протона. Для H^+ удельный заряд $\frac{e}{m} = 9,579 \cdot 10^8$ CGSMz-1. Масса протона в 1837,5 раза больше массы электрона.

Изотопы. Вышеописанными методами было показано, что атомы одного и того же элемента могут обладать разными массами. Атомы, обладающие одинаковыми химическими свойствами, но разными массами, получили название изотопов (см. таблицу изотопов), так как все они попадают в одну и ту же клетку периодической си-

стемы элементов, т. е. имеют один и тот же порядковый номер.

Изотоп водорода—дейтерий. Изотоп водорода был открыт спектроскопическим путём. Этот изотоп получил особое название дейтерия и особый символ $D (=H^2)$. Его масса приблизительно в 2 раза больше массы обычного водорода. Атомный вес тяжёлого водорода (определённый по отношению $1/16$ веса атома кислорода с атомным весом 16) соответствует 2,01473.

Дейтон. Положительно заряженный ион тяжёлого водорода называется дейтоном.

Тяжёлая вода D_2O . Вода, в состав молекул которой входит тяжёлый водород—дейтерий, называется тяжёлой водой. Физические свойства тяжёлой воды сильно отличаются от свойства обычной воды, молекулы которой состоят главным образом из изотопа водорода с массовым числом 1.

Шкала атомных весов. Открытие изотопов кислорода с атомным весом 16, 17 и 18, которые в обычном кислороде содержатся в отношениях 506:1:0,204, приводит к необходимости установления двух единиц атомных весов. Прежняя химическая единица равна $1/16$ части веса среднего атома кислорода (т. е. в основу кладётся естественная смесь изотопов кислорода), новая единица—физическая—равна $1/16$ части атома изотопа O^{16} . Атомный вес кислорода по физической шкале равен 16,0043. Для перехода от одной шкалы к другой существует соотношение $A_{\text{физ}} = A_{\text{хим}} \cdot 1,00027$.

Радиоактивность

Явления радиоактивности. Радиоактивными веществами называются такие вещества, которые без всякого предварительного воздействия на них извне ионизируют воздух вокруг себя и вследствие этого делают его электропроводящим, действуют на фотографическую бумагу, завернутую в не прозрачную для видимого света бумагу, и вызывают свечение экранов, покрытых такими веществами, как сернистый цинк. Радиоактивные вещества испускают тройного рода лучи: α , β и γ . Это излучение сопровождается превращением элементов.

Природа α -лучей. α -лучи представляют поток двукратно ионизированных атомов гелия He^{++} , носящих название α -частиц. α -частицы выбрасываются из атомов радиоактивных элементов с различной энергией. Энергию α -частицы можно измерить непосредственно из отклонения пучка α -частиц в магнитном поле. Двигаясь в воздухе, α -частицы постепенно теряют свою скорость. Каждая α -частица обладает определённой дальностью пробега в воздухе, которая измеряется в сантиметрах при температуре $15^\circ C$ и 1 ат. Дальность пробега обратно пропорциональна квадратному корню из атомного веса вещества, через которое проходит α -частицы.

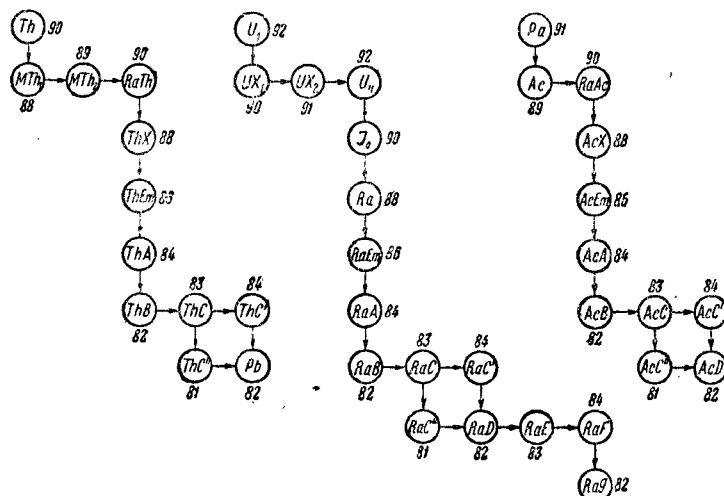
Природа β -лучей. β -лучи представляют собой поток электронов. β -лучи выбрасываются из атомов с различными скоростями.

Природа γ -лучей. γ -лучи представляют одну из форм лучистой энергии, спектр

которых частью совпадает, частью же лежит за спектром лучей Рентгена.

В результате выброса из атома α - или β -частицы происходит превращение одного химического элемента в другой. Каждому отдельному радиоактивному превращению отвечает совершенно определенное, характерное для него излучение или α или β ; γ -излучение никогда не встречается само по себе, а всегда сопровождается β - или (в малой интенсивности) α -излучением.

Скорость радиоактивного распада атомов. Скорость распада радиоактивных атомов



Фиг. 6. Радиоактивные семейства

подчиняется уравнению мономолекулярной химической реакции

$$N = N_0 e^{-kt},$$

где N — число атомов, не распавшихся к моменту времени t ;

N_0 — исходное число атомов;

e — основание натуральных логарифмов;

k — константа распада.

Обратная величина k называется средней продолжительностью жизни $\tau = \frac{1}{k}$. Кон-

станта распада, или средняя продолжительность жизни элемента, всегда одинакова, независимо от того, в каком соединении он находится. Химическое вмешательство во время распада также не оказывает на него ни малейшего действия. Константа распада не зависит от температуры (в пределах, достигнутых в лабораториях).

Между константой распада и дальностью пробега α -частиц R существует зависимость

$$\lg k = A + B \lg R,$$

где A и B — константы, меняющиеся при переходе от одного радиоактивного ряда превращений к другому.

Закон смещения. Если распадающийся элемент излучает α -частицу, то образуется элемент, стоящий в периодической системе на две группы влево от распадающегося

элемента, а его масса на четыре единицы меньше исходного; если распадающийся элемент излучает β -частицу, то образуется элемент, стоящий на одну группу вправо, а его атомный вес остаётся таким же, как у исходного.

Радиоактивные семейства. Все природные радиоактивные элементы делятся на три семейства: ряд тория, ряд урана и ряд протактиния. На фиг. 6 приведены схемы превращения в этих рядах. В кружочках стоят наименования элементов: цифры около кружочков означают порядковое число

элемента; вертикальная стрелка соответствует выбросу одной α -частицы, горизонтальная — выбросу электрона. Конечным продуктом распада во всех трёх семействах являются изотопы свинца: Pb, RaG и AcD.

Единица радиоактивности. Количество радиоактивных веществ можно характеризовать массой, выраженной в граммах или миллиграммах; однако принято выражать эту массу в особых единицах, характеризующих активность данного элемента. Эти единицы называются кюри и определяются следующим образом: 1 кюри радона (радиоэманиации RaEm) равен количеству радона, находящемуся в равновесии

с 1 г радия. Это количество радона при 0°C и 760 мм имеет объём $0,66 \text{ мм}^3$ и массу $6,51 \cdot 10^{-6} \text{ г}$. Так как кюри — единица большая, то пользуются производными единицами: 1 милликюри (10^{-3} кюри), 1 микрокюри (10^{-6} кюри). Кюри любого радиоактивного элемента есть такое его количество, при котором в 1 сек. распадается $3,7 \cdot 10^{10}$ атомов этого элемента.

Строение ядра и искусственное преобразование атомов

Заряд и масса ядра. На основании опытов по изучению отклонения α -частиц при прохождении их через тонкие металлические фольги было найдено, что в центре атома находится положительно заряженное ядро, которое занимает очень небольшую часть пространства атома (диаметр ядра имеет размеры порядка 10^{-12} — 10^{-13} см). Заряд ядра атомов оказался равным порядковому номеру элемента, если за единицу заряда принять заряд электрона. Следовательно, порядковый номер соответствует числу зарядов ядра. Так как атом в целом электро-нейтрален, то, следовательно, вокруг ядра располагаются электроны, число которых должно быть равно числу зарядов ядра, т. е. общее число электронов в атоме равно порядковому номеру элемента. Так как масса электрона много меньше массы протона,

то очевидно, что вся масса атома приходится на его ядро. Массу ядра в относительных единицах с достаточной степенью точности можно принять равной атомному весу. Для полной характеристики атома элемента обычно пишут символ элемента, сверху — в виде индекса массовое число, внизу — порядковый номер, например, C_6^{12} и т. п.

Нейтрон. В 1930 г. было открыто, что при облучении α -частицами лития и особенно бериллия испускаются частицы, масса которых очень близка к массе протона, но без заряда. Эти частицы получили название нейтронов. Масса нейтрона по физической шкале равна 1,00897. Нейтрону можно придать порядковый номер $Z = 0$.

Позитрон. При исследовании космических лучей (лучи, поступающие из мировых пространств на землю) Д. В. Скобельциным был открыт ещё один новый вид частиц, получивших название позитрона. Позитроны имеют положительный заряд, по величине равный заряду электрона, и массу, равную массе электрона. Позитроны имеют небольшую продолжительность жизни. При встрече с электроном позитрон легко вступает во взаимодействие. Оба они уничтожаются и образуются фотоны.

Строение ядра. По современным представлениям ядро атома, как было доказано Е. Н. Гапоном и Д. Д. Иваненко, построено из протонов и нейтронов. Так как атом в целом — электронейтральная система, то очевидно, что число протонов в ядре равно порядковому номеру элемента, а число нейтронов соответствует величине $A - Z$, где A — массовое число элемента (округлённый до целого числа атомный вес).

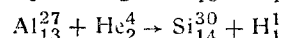
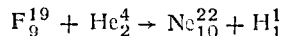
Закон эквивалентности массы и энергии. Эйнштейном был найден закон, по которому всякая масса обладает энергией или всякая энергия обладает массой. Между энергией E и массой m имеется соотношение $E = mc^2$, где c — скорость света.

Дефекты массы. Рассматривая точные значения атомных весов изотопов элементов, нетрудно заметить, что у лёгких элементов атомная масса несколько больше ближайших целых чисел, а у элементов со средним атомным весом — несколько меньше. У самых тяжёлых атомов атомные массы вновь становятся несколько больше целых чисел. Разность между нецелой истинной атомной массой M и целым массовым числом A называется дефектом массы $\Delta = M - A$. Наиболее устойчивыми являются элементы, для которых Δ отрицательна.

Энергия связи частиц в ядре. Так как число протонов и нейтронов в ядре всегда известно, а также точно известны массы протона и нейтрона, то всегда легко рассчитать атомный вес элемента. Расчёт показывает, что сумма масс протонов и нейтронов, входящих в ядро, всегда больше, чем атомный вес, определённый опытным путём. Это объясняется тем, что при образовании устойчивого ядра происходит превращение части массы в энергию излучения. Так, при образовании 1 граммома гелия из протонов и нейтронов выделяется энергия, равная 28 MeV на 1 граммом. Рассчитанная таким

образом величина, делённая на число протонов и нейтронов в ядре, характеризует собой энергию связи частиц в ядре.

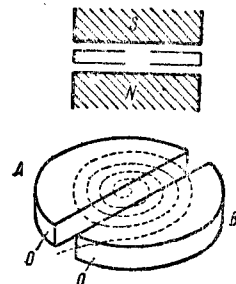
Искусственное преобразование атомных ядер. а) Опыты Резерфорда. Подвергая азот бомбардировке α -частицами, испускаемыми RaC, Резерфорд нашёл, что при удачном столкновении α -частица захватывается ядром азота. При этом выбрасывается протон, и азот превращается в изотоп кислорода по реакции: $\text{N}_7^{14} + \text{He}_2^4 \rightarrow \text{O}_8^{18} + \text{H}_1^1$. Аналогичные реакции наблюдались с рядом других элементов, например:



б) Циклотрон. Источником быстрых частиц в опытах Резерфорда служили радиоактивные вещества. Помимо слабой интенсивности α -частиц, испускаемых этими веществами, они обладают скоростями, а следовательно, и энергиями, лежащими в определённых узких пределах. Весьма удобной установкой для получения быстрых частиц искусственным путём является циклотрон.

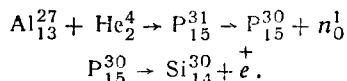
Принцип циклотрона очень прост. Он представляет собой металлическую коробку в виде плоского полого цилиндра, разрезанную пополам (дуанты D) (фиг. 7). Коробка помещается в поперечное магнитное поле S, N и на обе половинки её накладывается сравнительно небольшая разность потенциалов (порядка 10 000 — 20 000 V) от высокочастотного генератора. Если в разрезе между дуантами находится положительный ион, и левый дуант A заряжен отрицательно, то ион будет втянут в него и в магнитном поле начнёт двигаться по кругу. Описав полуокружность, ион вновь попадает в пространство между дуантами. В это время правый дуант B заряжается отрицательно. В результате ион испытывает новое ускорение и втягивается в правый дуант. Дальше то же повторяется в левом дуанте; вследствие этого, проходя пространство между дуантами, он будет получать всякий раз новые добавочные импульсы. Если разность потенциалов между дуантами равна V_1 , то при n оборотах ион приобретает энергию, эквивалентную ускоряющему потенциалу $V = 2nV_1$. При помощи циклотронов возможно получение протонов, α -частиц и дейтонов с энергиями в несколько десятков миллионов электронов-вольт.

Искусственные радиоактивные элементы. Под действием ударов искусственно полученных быстрых протонов, α -частиц и дейтонов удалось осуществить большее число реакций искусственного преобразования элементов. Многие из вновь возникающих изотопов оказываются радиоактивными, например, в результате обстрела алюминия



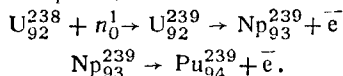
Фиг. 7. Схема циклотрона

α -частицами получается радиоактивный фосфор, который затем в результате излучения позитрона e^+ превращается в устойчивый изотоп кремния. Схема ядерной реакции:



n_0^1 — нейтрон.

Деление тяжёлых ядер. Цепной распад урана. Принципиально новый тип ядерных реакций был открыт в 1939 г. Тяжёлые ядра (уран, торий, протактиний) в результате захвата нейтрона раскалываются приблизительно пополам с образованием двух новых элементов с близкими массами, и эти вновь возникшие ядра разлетаются с огромной энергией. В результате распада урана образуются изотопы элементов средней части периодической системы от селена ($Z = 32$) до лантана ($Z = 56$). Деление тория и протактиния вызывается только быстрыми нейтронами. Деление урана может быть вызвано как быстрыми, так и медленными (тепловыми) нейтронами. Тепловые нейтроны вызывают деление только изотопа урана с массовым числом 235, но не урана с массовым числом 238. Если скорость нейтрона равна 25 eV, то они захватываются U_{92}^{238} , который превращается в неустойчивый изотоп урана с массой 239. Последний распадается с выбросом электронов и превращается в элементы с атомными номерами $Z = 93$ — нептуний Np и $Z = 94$ — плутоний Pu по следующей реакции:



Энергия, освобождаемая при делении ядра урана, составляет около 200 MeV. В процессе деления выбрасываются быстрые нейтроны, которые теряют энергию путём неупругих столкновений с ядрами урана. В случае изотопа урана с массой 235 под действием медленных нейтронов происходит цепной распад, так как в результате исходного деления образуется не меньше чем два нейтрона, которые в свою очередь вызывают распад. Число распадающихся атомов лавинно нарастает, что приводит к взрыву с выделением огромного количества энергии. Образующиеся в результате распада нейтроны могут вылетать за пределы взятого объёма урана, и цепной процесс остановится. Поэтому размер устройства, содержащего уран, должен быть больше критического, т. е. такого, при котором количество освобождаемых при делении нейтронов в точности равно их потере вследствие вылета и захватов, не сопровождающихся делением. Изотоп урана с массой 235 содержится в природном уране в количестве 0,71%. Поэтому для осуществления реакции цепного взрыва необходимо уран обогатить содержанием лёгкого изотона, что достигается с большим трудом рядом методов (электромагнитное разделение, термодиффузия и т. д.). Цепному распаду подвергается и элемент с $Z = 94$ — плутоний. Плутоний получают из обычного урана в так назы-

ваемых обогащённых котлах. В котлы помещают блоки из металлического урана или его окиси, в которые вставляют стержни из графита. Под действием нейтронов начинается распад урана. Для того чтобы реакция поддерживалась автоматически, необходимы тепловые нейтроны, вызывающие цепной распад U^{235} . Замедлителем нейтронов служит графит. Таким образом, за счёт распада U^{235} поддерживается реакция превращения U^{238} в Pu^{239} . При этом в котлах выделяется большое количество энергии, которая может быть использована для мирных целей (в паросиловых установках). Образовавшийся Pu отделяется от урана химическим путём. Открытие цепного распада урана открывает новые перспективы перед техникой, так как человечество получило в свои руки мощный источник энергии.

Строение атомов и спектры атомов

Модель атома Резерфорда-Бора. В центре атома находится положительное ядро, число зарядов которого равно порядковому номеру элемента; вокруг ядра, подобно планетам, движутся электроны, число которых тоже равно порядковому номеру элемента. По законам классической электродинамики электрон, движущийся по круговой орбите, должен излучать, т. е. терять энергию и, следовательно, в конце концов упасть на ядро. Поэтому Бором были введены специальные постулаты.

Теория Бора. Первый постулат Бора гласит, что электрон не теряет энергии при своём круговом движении, если он движется по особым квантовым орбитам. Эти орбиты должны удовлетворять условию:

$$mva = n \frac{h}{2\pi},$$

где m и v — масса и скорость движения электрона;
 a — радиус электронной орбиты;
 h — универсальная постоянная Планка;

n — главное квантовое число, которое может быть равно только целым числам: 1, 2, 3 ... и т. д.

Второй постулат Бора гласит, что когда электрон в атоме перескакивает с более отдалённой орбиты на более близкую к ядру, то потерянная атомом энергия переходит в один квант лучистой энергии, испускаемой атомом, т. е.

$$E_2 - E_1 = h\nu,$$

где E_2 и E_1 — энергии электрона на высшей и низшей орбите;
 ν — частота испускаемого света.

Вводя эти постулаты в классическую электродинамику, легко определить радиус электронной орбиты

$$a = \frac{h^2}{4\pi^2 Ze^2 m} n^2,$$

скорость электрона

$$v = \frac{2\pi Ze^2}{h} \cdot \frac{1}{n},$$

полную энергию электрона E_n на орбите с квантовым числом n :

$$E_n = -\frac{Ze^2}{2a},$$

частоты спектральных линий, испускаемых атомом при переходе электрона с орбит с энергиями E_2 на орбиты с энергиями E_1 :

$$\nu = \frac{2\pi^2 me^4}{h^3} Z^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \text{сек}^{-1}.$$

Теория оказалась хорошо применима к атому водорода, объяснив линейчатый спектр атомного водорода.

Недостатки теории Бора. Теория Бора не смогла объяснить целый ряд наблюдаемых фактов: дублетный характер линий в атоме водорода, спектры атомов, содержащих более чем один электрон.

Четыре квантовых числа. Для целей расшифровки спектров и их классификации пришлось ввести новые квантовые числа, характеризующие положение электрона в атоме. Электроны в атомах группируются в слои. Каждый слой характеризуется главным квантовым числом n . Первый слой имеет главное квантовое число $n=1$, второй $n=2$ и т. д. Слои делятся на уровни. Каждый уровень характеризуется побочным квантовым числом l . Число l может быть равным для каждого слоя $0, 1, 2, \dots, n-1$. Число уровней в слое определяется числом возможных значений l . Каждый уровень разбивается на ряд подуровней, которые характеризуются внутренним квантовым числом $j = l + s$, где s — квантовое число, характеризующее вращение электрона вокруг собственной оси и равное $+\frac{1}{2}$ и $-\frac{1}{2}$.

(электрон может вращаться по часовой стрелке — характеризуется квантовым числом $+\frac{1}{2}$ и против часовой стрелки — характеризуется квантовым числом $-\frac{1}{2}$). Число подуровней, на которое распадается каждый уровень, определяется числом возможных значений j . Каждый подуровень в силовом поле (электрическом или магнитном) расщепляется ещё на ряд подуровней, которые характеризуются магнитным квантовым числом m . Оно может принимать все отличающиеся на единицу значения, лежащие между $+j$ и $-j$.

Символическое обозначение термов. Энергия электрона в атоме (терм) зависит от его положения, которое определяется четырьмя квантовыми числами. Термы записываются так, что вначале пишут главное квантовое число, затем букву, характеризующую побочное квантовое число ($l=0$ приписывают букву s ; $l=2$ — букву p ; $l=3$ — букву d ; $l=4$ — букву f и т. д.); снизу в виде индекса записывают внутреннее квантовое число и сверху слева — в виде индекса мультиплетность терма, т. е. число подуров-

ней, на которые расщепляется данный уровень, определяемое числом возможных значений j . Например, для одноэлектронного атома при $n=2, l=1, j=\frac{1}{2}$ терм символически запишется: $2^2 P_{1/2}$.

Правила отбора. Переходы электронов в атомах с одного уровня на другой возможны не все, а только те, которые удовлетворяют определённым условиям: квантовое число n может изменяться на любую величину; квантовое число l всегда увеличивается или уменьшается на единицу: $\Delta l = \pm 1$; квантовое число j также уменьшается или увеличивается на единицу или не меняется: $\Delta j = \pm 1$ или 0 . Переходы между другими уровнями энергии не вполне исключаются, но происходят гораздо реже, чем нормальные переходы.

Принцип Паули. Внутри атома не могут существовать два электрона, у которых все четыре квантовых числа — n, l, j, m — одинаковы, т. е. если какой-нибудь электрон внутри атома имеет определённые значения квантовых чисел n_a, l_a, j_a, m_a , то характеризованное ими состояние считается занятым и не может быть занято никаким другим электроном.

Принцип Паули и построение периодической системы. Принцип Паули позволяет определить, сколько электронов может быть расположено в данном слое на данном уровне и на данном подуровне. Число электронов с одинаковыми значениями n, l и j , различающихся магнитным квантовым числом m , равно $2j+1$; число электронов с одинаковыми квантовыми числами n и l равно $2(2l+1)$; число электронов с одинаковым квантовым числом n равно $2n^2$. Пользуясь спектроскопическими данными и принципом Паули, можно точно установить, как распределяются электроны по слоям, уровням и подуровням во всех атомах периодической системы элементов, а также установить число элементов, входящих в каждый период, и причину повторения химических свойств элементов в группах.

Волновая теория. Теория Бора не смогла объяснить необходимости введения новых квантовых чисел, правил отбора; кроме того, она оказалась бессильной в своих попытках объяснить строение молекул. В 1924 г. де-Бройль установил, что любая материальная частица обладает волновыми свойствами. Всякая частица, обладающая массой m и скоростью движения v , одновременно ведёт себя как волна, длина которой λ , частота ν и скорость распространения u . Длина этой

волны определяется соотношением $\lambda = \frac{h}{mv}$,

где h — универсальная постоянная Планка. Волны, свойственные движущимся частицам, называются волнами материи. Каждая частица обладает и корпускулярной и волновой природой, в одних явлениях проявляются свойства частицы как корпускулы, в других — как волновой процесс. Теория де-Бройля была экспериментально подтверждена в опытах с дифракцией электронов.

На базе теории де-Бройля была создана математическая теория атома и молекулы, так называемая квантовая, или волновая, механика, которая объяснила большинство найденных эмпирических закономерностей и позволила предсказать целый ряд новых явлений.

ТЕРМОХИМИЯ

Тепловой эффект реакции. Каждая химическая реакция сопровождается либо выделением теплоты (экзотермическая реакция), либо поглощением теплоты (эндотермическая реакция). Тепловым эффектом реакции называется то количество теплоты, которое выделяется или поглощается при превращении одного моля вещества. В технике расчёт ведётся на 1 кг. Тепловой эффект реакции зависит от условий (V, P, T), в которых протекает реакция. В отличие от термодинамики, в термохимии теплота, выделяемая системой, принимается положительной и обозначается \bar{Q} . Поэтому $\bar{Q} = -Q$. Тепловой эффект реакции при постоянном объёме \bar{Q}_v равен убыли внутренней энергии системы U при превращении одного моля вещества

$$\bar{Q}_v = -\Delta U_v.$$

Тепловой эффект реакции при постоянном давлении равен убыли энтальпии системы при превращении одного моля вещества

$$\bar{Q}_p = -\Delta H_p.$$

Между \bar{Q}_v и \bar{Q}_p существует зависимость

$$\bar{Q}_p = \bar{Q}_v - \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + P \right] \Delta V.$$

Для идеального газа $\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = 0$, а $P\Delta V$ при превращении одного моля равно ΔnRT , поэтому

$$\bar{Q}_p = \bar{Q}_v - \Delta nRT,$$

где Δn — изменение количества граммолей газа при превращении одного моля вещества.

Экспериментальное определение \bar{Q}_p значительно легче, чем \bar{Q}_v .

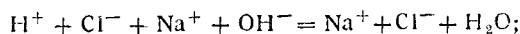
Для конденсированных систем $P\Delta V$ мало, поэтому $\bar{Q}_p \approx \bar{Q}_v$.

Теплота растворения. Растворение всегда сопровождается выделением или поглощением теплоты. Различают интегральную, дифференциальную и полную теплоты растворения. Интегральной теплотой растворения называется то количество теплоты, которое выделяется при растворении при постоянной температуре одной граммолекулы вещества в количестве растворителя, достаточном для образования раствора определённой концентрации. Дифференциальной теплотой растворения называется теплота, которая выделяется при растворении при постоянной температуре одной граммолекулы вещества в большом количестве раствора определённой концентрации так, чтобы введение одной

граммолекулы не вызвало заметного изменения концентрации раствора. Теплоты растворения важнейших веществ даны в табл. 18. Полной теплотой растворения называется интегральная теплота, получаемая при образовании насыщенного раствора.

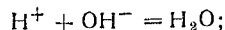
Теплота разведения. Теплотой разведения называется то количество теплоты, которое выделяется при постоянной температуре при прибавлении одной граммолекулы растворителя к большому количеству раствора определённой концентрации.

Теплота нейтрализации. Тепловой эффект нейтрализации (см. Тепловой эффект реакции, стр. 325) граммоэквивалента сильной кислоты в разбавленном растворе граммоэквивалентом сильного основания практически одинаков для различных пар кислот и оснований и равен в среднем $\bar{Q}_p = -\Delta H = -13,8$ ккал. Равенство тепловых эффектов нейтрализации объясняется теорией электролитической диссоциации как результат практически полной диссоциации сильных кислот, сильных оснований и солей сильных кислот и оснований в разбавленных растворах. В результате реакция нейтрализации сводится лишь к образованию воды из ионов водорода и гидроксидов. Например, нейтрализация соляной кислоты едким натром:



$$\bar{Q}_p = -\Delta H = -13,68 \text{ ккал},$$

или, сокращая в обеих частях равенства одинаковые ионы:

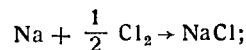


$$\bar{Q}_p = -\Delta H = -13,68 \text{ ккал}.$$

Теплота нейтрализации слабой кислоты сильным основанием или сильной кислоты слабым основанием обычно меньше 13,8 ккал.

Закон постоянства сумм теплоты является основным законом термохимии. Тепловой эффект химической реакции при $t = \text{const}$ зависит только от начального и конечного состояния системы и не зависит от того, каким путём система переходит от начального состояния к конечному.

Теплота образования соединений из элементов и теплота горения. Теплотой образования соединений из элементов называется тепловой эффект образования его из простых (элементарных) веществ, так как в термохимии понятие элемента совпадает с понятием простого вещества. Например, реакция образования NaCl из элементов записывается:



её тепловой эффект:

$$\bar{Q}_p = -\Delta H = 97,8 \text{ ккал}.$$

Теплота образования простых веществ принимается равной нулю. Полученные опытным путём или путём вычисления теплоты образования различных соединений для стандартных условий — 25°C и 1 ат — приведены в табл. 17. Пользуясь этой таблицей, можно определить тепловые эффекты реакций.

Теплота образования соединений из элементов чаще всего определяется по теплотам сгорания их, которые легко определяются сжиганием вещества в калориметрической бомбе.

Теплота сгорания важнейших соединений дана в табл. 17 (стр. 347).

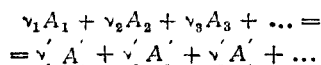
По теплоте сгорания может быть определена теплота реакции:

$$\bar{Q} = \Sigma \bar{Q}_1 - \Sigma \bar{Q}_2,$$

где $\Sigma \bar{Q}_1$ — сумма теплот сгорания веществ, вступающих в реакцию;

$\Sigma \bar{Q}_2$ — сумма теплот сгорания веществ, образующихся в результате реакции.

Зависимость теплового эффекта реакции от температуры. Для реакции.



Зависимость теплового эффекта от температуры выражается следующей формулой:

$$\bar{Q} = \bar{Q}_0 + \int_0^T \Sigma [\nu C] dT,$$

или

$$\bar{Q} = \bar{Q}_{T_0} + \int_{T_0}^T \Sigma [\nu C] dT,$$

где

$$\Sigma [\nu C] = \nu_1 C_1 + \nu_2 C_2 + \nu_3 C_3 + \dots - \\ - \nu'_1 C'_1 - \nu'_2 C'_2 - \nu'_3 C'_3 - \dots$$

$\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots, \nu'_1, \nu'_2, \nu'_3, \dots$ — стехиометрические коэффициенты,

а $C_1, C_2, C_3, \dots, C'_1, C'_2, C'_3, \dots$ — молярные теплоёмкости веществ $A_1, A_2, A_3, \dots, A'_1, A'_2, A'_3, \dots$ и т. д.,

\bar{Q}_0 — тепловой эффект реакции при абсолютном нуле;

\bar{Q}_{T_0} — тепловой эффект реакции при абсолютной температуре T_0 .

ПРИМЕНЕНИЕ ВТОРОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ К ПЕРЕХОДУ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ

Уравнение Клаузиуса-Клапейрона выражает зависимость между давлением, температурой системы T и теплотой λ превращения фаз индивидуального вещества:

$$\lambda = T (V_2 - V_1) \frac{dP}{dT},$$

где λ — теплота превращения одного моля или одного грамма при постоянной температуре T и давлении P , которое преодолевается при фазовом переходе;

V_1 — молярный, или удельный, объём фазы, более устойчивой при низкой температуре;

V_2 — молярный, или удельный, объём фазы, более устойчивой при высокой температуре.

Это уравнение применимо к процессам превращения фаз, например испарению, плавлению, возгонке. Оно неудобно для интегрирования, так как содержит много переменных (λ, V_1, V_2, P, T), поэтому часто пользуются приближённым уравнением

$$\lambda = T (V_2 - V_1) \frac{\Delta P}{\Delta T},$$

где ΔP и ΔT — конечные изменения давления и температуры.

Испарение. Для случая испарения индивидуальной жидкости уравнение имеет вид:

$$\lambda = T (V_{\text{пар}} - V_{\text{жидк}}) \frac{dP}{dT};$$

$\frac{dP}{dT}$ — изменение упругости пара жидкости с температурой.

Интегрирование его (при предположении $\lambda = \text{const}, V_1 \ll V_2$ и $V_2 = \frac{RT}{P}$) даёт выражение:

$$\lg P = \lg C - \frac{\lambda}{RT},$$

или

$$P = C e^{-\frac{\lambda}{RT}},$$

и интегрирование в пределах от T_1 до T_2 — выражение:

$$\lg P_2 - \lg P_1 = \frac{\lambda}{2,303 R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right).$$

Это важное приближённое выражение даёт возможность определять теплоту испарения по двум значениям давления насыщающих паров и соответствующим им температурам, либо по известной теплоте испарения и одному значению давления пара находить давление пара при другой температуре. Более точное выражение получается, если при интегрировании учесть, что λ зависит от T . Зависимость λ от T даётся уравнением, аналогичным уравнению зависимости теплового эффекта реакции от температуры.

Упругость паров некоторых жидкостей дана в табл. 15 и 16.

Кривые зависимости упругости пара жидкостей от температуры. Типичные кривые зависимости давления пара жидкостей от абсолютной температуры T изображены на фиг. 8. Кривые обрываются в критических точках.

Уравнение $P = C e^{-\frac{\lambda}{RT}}$ удовлетворительно описывает эти кривые лишь при температурах, далёких от критической.

Плавление. Для случая плавления уравнение имеет вид:

$$\lambda = T (V_{\text{жидк}} - V_{\text{тв}}) \frac{dP}{dT},$$

где λ — теплота плавления;
 $V_{жидк}$ и $V_{тв}$ — молярные объёмы жидкой и твёрдой фаз;
 P — внешнее давление.

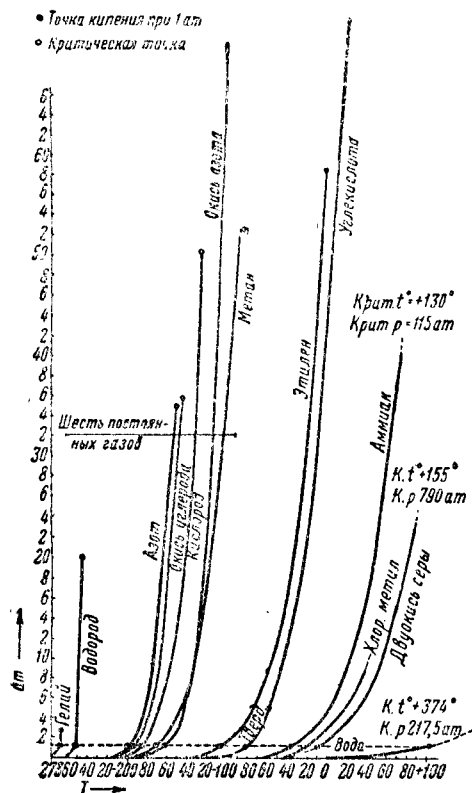
В ряде случаев удобно применение приближённой формулы:

$$\lambda = T (V_{жидк} - V_{тв}) \frac{\Delta P}{\Delta T},$$

или

$$\Delta T = \frac{T (V_{жидк} - V_{тв}) \Delta P}{\lambda}.$$

Последнее выражение даёт возможность определить изменение температуры плавления чистого вещества ΔT , вызванное изменением внешнего давления ΔP .



Фиг. 8. Кривые давления пара жидкостей

Из этого же выражения видно, что если $V_{жидк} < V_{тв}$ при температуре плавления, то с увеличением давления температура плавления должна уменьшаться. Такие отношения наблюдаются у воды, висмута и ртути.

ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ

Определение. Функция состояния называется характеристической, если при помощи этой функции и её производных разных порядков все термодинамические свойства системы могут быть выражены в явной форме. Характеристической функцией состояния

может быть лишь при вполне определённых независимых переменных.

Внутренняя энергия. Внутренняя энергия U является характеристической функцией при независимых переменных S и V . Неудобством при использовании этой функции для выражения различных термодинамических свойств системы является переменная S — энтропия, так как последняя не может быть измерена.

Энтальпия. Энтальпия, или теплосодержание, H является характеристической функцией при независимых переменных S и P . Энтальпия, так же как внутренняя энергия, неудобна для выражения термодинамических свойств системы (см. Внутренняя энергия, стр. 327). С внутренней энергией U энтальпия связана соотношением

$$H = U + PV.$$

Свободная энергия. Часть внутренней энергии системы U , которая может быть превращена в работу при постоянной температуре T , называется свободной энергией F . Она определяется уравнением

$$F = U - TS,$$

где S — энтропия системы.

Свободная энергия является характеристической функцией, когда работа системы A состоит только из работы расширения:

$$dF = -PdV - SdT,$$

откуда

$$\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V = -S; \quad \left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T = -P,$$

т. е. энтропия есть мера убыли свободной энергии в системе с ростом температуры при постоянном объёме системы, а давление есть мера убыли свободной энергии с ростом объёма при постоянной температуре.

Свободная энергия является характеристической функцией (см. Характеристические функции, стр. 327) при независимых переменных V и T . Так как обе переменные легко измеримы, то свободная энергия является очень удобной функцией для выражения различных термодинамических свойств системы через неё и её производные.

Свободная энергия при постоянном давлении (термодинамический потенциал). Свободной энергией при постоянном давлении Φ называется та часть энтальпии H системы, которая при постоянном давлении P и постоянной температуре T может быть превращена в полезную работу A (без работы расширения).

Эта часть определяется выражением

$$\Phi = H - TS;$$

S — энтропия системы.

Свободная энергия при постоянном давлении является функцией состояния. Со свободной энергией F она связана соотношением

$$\Phi = F + PV.$$

Важным дифференциальным уравнением является

$$d\Phi = VdP - SdT,$$

откуда следует, что

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial T}\right)_P = -S; \quad \left(\frac{\partial \Phi}{\partial P}\right)_T = V,$$

т. е. энтропия является мерой убыли Φ — системы с ростом температуры при постоянном давлении, а объём является мерой прироста Φ с увеличением давления при постоянной температуре.

Свободная энергия при постоянном давлении является характеристической функцией при независимых переменных P и T , что делает её особенно ценной, так как, во-первых, P и T легко измеримы, а во-вторых, большинство процессов происходит при постоянном давлении.

Условия равновесия. Общими условиями равновесия системы являются:

при постоянных U и V

$$(dS)_{U,V} < 0;$$

система находится в устойчивом равновесии, если её энтропия постоянна и максимальна в данных условиях;

при постоянных V и T

$$(dF)_{V,T} > 0;$$

т. е. система находится в устойчивом равновесии, если её свободная энергия постоянна или минимальна в данных условиях.

При постоянных P и T

$$(d\Phi)_{P,T} > 0.$$

Система находится в устойчивом равновесии, если её свободная энергия при постоянном давлении постоянна и минимальна в данных условиях.

РАСТВОРЫ

Концентрация. Существуют различные выражения концентрации данного вещества в растворе.

Весовые концентрации. Весовой концентрацией данного вещества в растворе называется число его граммов, содержащихся в единице веса или объёме раствора или другого компонента. Единицы весовой концентрации $г/г$, $г/кг$, $г/мл$, $г/л$.

Объёмные концентрации. Объёмной концентрацией данного вещества в растворе называется число его миллилитров или литров, содержащихся в единице объёма раствора или второго компонента. Единицы объёмной концентрации $мл/л$, $л/л$ и др.

Нормальная концентрация. Нормальной концентрацией, или нормальностью, раствора называется число граммэквивалентов вещества, содержащееся в 1 л раствора.

Молярные концентрации. Молярной концентрацией данного вещества в растворе называется число его молей, содержащихся в единице веса или в единице объёма раствора, или в одном моле смеси или в одном моле другого компонента. Единицы молярной концентрации $моль/кг$, $моль/л$, $моль/моль$.

Безразмерные концентрации ($г/г$, $мл/мл$, $моль/моль$) могут быть выражены в процентах.

Наиболее часто в теории употребляется концентрация, выраженная в молях данного вещества, содержащихся в одном моле смеси:

$$N_i = \frac{n_i}{\sum n},$$

где N_i — концентрация, называемая молярной долей;

n_i — число молей данного вещества в смеси;

$\sum n$ — число молей всех веществ в смеси.

Растворы газов в жидкостях

Растворимость газов в жидкостях. Растворимость газов в жидкостях зависит от природы газа, природы растворителя, парциального давления газа и температуры (см. Влияние температуры на растворимость газов, стр. 328).

Растворимость газов часто характеризуют коэффициентами l и β .

Коэффициентом растворимости l называют число объёмов газа при заданных условиях (без приведения их к нормальным условиям), растворившихся в одном объёме жидкости.

Коэффициентом абсорбции β называют число объёмов газа, приведённых к нормальным условиям (0° ; 1 ат), поглощённых одним объёмом жидкости при парциальном давлении газа в 1 ат .

Концентрацию растворённого газа в жидкости выражают в граммах или миллиграммах газа в 1 л растворителя или в объёмах растворённого газа в 1 л растворителя.

Закон Генри-Дальтона. Растворимость C_i (весовая концентрация насыщенного раствора) газа в жидкости при постоянной температуре прямо пропорциональна парциальному давлению P_i этого газа в смеси над жидкостью при условии, что газ не взаимодействует с растворителем:

$$C_i = kP_i.$$

Закон Генри-Дальтона оправдывается, как это показано И. М. Сеченовым, лишь при малых давлениях.

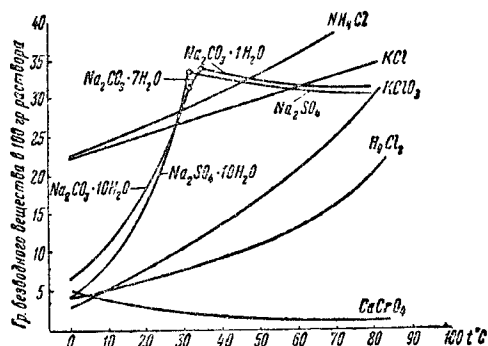
Влияние температуры на растворимость газов. С повышением температуры растворимость всех газов уменьшается. На этом основана термическая деаэрация питательной воды для паровых котлов. При кипячении воды достигается практически полное удаление растворённого воздуха.

Растворы твёрдых тел в жидкостях

Растворимость и влияние температуры на неё. Растворимостью твёрдого тела в жидкости называется весовая концентрация насыщенного раствора. Она часто выражается в весовых процентах растворённого вещества от веса раствора. Растворимость зависит от природы твёрдого тела, природы растворителя, температуры и в меньшей степени от давления.

С повышением температуры растворимость некоторых (большинства) твёрдых тел увеличивается, а некоторых (меньшинства)

уменьшается (фиг. 9). Кривые растворимости обычно непрерывны, за исключением тех случаев, когда наблюдаются переходы твёрдого вещества из одной формы в другую (различные кристаллические формы, различные кристаллогидраты). Увеличение растворимости при повышении температуры на 1° , выраженное в процентах, называется температурным коэффициентом растворимости. Тела, растворимость которых увеличивается с повышением температуры, обычно растворяются с поглощением тепла и, наоборот,



Фиг. 9. Зависимость растворимости веществ от температуры

тепла, растворимость которых уменьшается с увеличением температуры, растворяются с выделением тепла.

Растворимость важнейших твёрдых тел дана в табл. 18.

Законы разбавленных растворов

Закон Рауля. Давление пара любого вещества понижается, если в нём растворить другое вещество. Относительное понижение давления паров данного вещества численно равно молярной доле второго вещества в смеси

$$\frac{P_1^0 - P_1}{P_1} = N_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2},$$

где P_1^0 — давление паров чистого растворителя;

P_1 — давление паров растворителя над раствором;

N_2 — молярная доля второго компонента;

n_1 — число граммолекул первого вещества (растворителя) в смеси;

n_2 — число граммолекул второго компонента в смеси.

Этот закон может быть выражен иначе: молекулярное понижение температуры заморзания (см. Криоскопия, стр. 329) и молекулярное повышение температуры кипения (см. Эбулиоскопия, стр. 329) являются величинами постоянными для данного растворителя и не зависят от природы растворённого вещества.

Закон оправдывается лишь для разбавленных растворов.

Криоскопия. Температура заморзания воды или другой жидкости понижается при

растворении в ней какого-либо вещества, не вымерзающего вместе с растворителем. Понижение температуры заморзания становится понятным при рассмотрении фиг. 10, изображающей кривые давления пара чистого растворителя в жидком и твёрдом состоянии AOE и кривую давления пара растворителя над раствором DC, лежащую всегда ниже кривой чистого растворителя. Точка заморзания растворителя в растворе T_g лежит левее точки заморзания чистого растворителя T_s .

Для разбавленных растворов понижение точки заморзания растворителя ΔT_g пропорционально молярной концентрации растворённого вещества и не зависит от природы последнего:

$$\Delta T_g = Kn_2 = K \frac{g}{M},$$

где n_2 — молярная концентрация растворённого вещества, выраженная в моль/1000 г;

g — количество граммов вещества, растворённого в 1000 г растворителя;

M — молекулярный вес растворённого вещества;

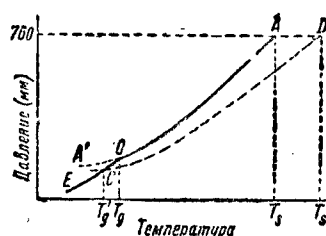
K — криоскопическая константа, называемая молекулярным понижением температуры заморзания; зависит от природы растворителя (для воды — 1,856, бензола — 5,146 и т. д.).

Эта формула широко используется для определения молекулярных весов по понижению температуры заморзания растворителя:

$$M = K \frac{g}{\Delta T_g}.$$

Метод определения молекулярных весов по понижению температуры заморзания носит название криоскопии.

Эбулиоскопия. Температура кипения воды или другой жидкости повышается при рас-



Фиг. 10. Понижение давления пара растворителя в растворах нелетучего растворённого вещества

творении в ней какого-либо нелетучего вещества, что ясно видно из фиг. 10, изображающей кривые давления паров чистого растворителя AOE и давления паров растворителя над раствором DC. Жидкость закипает, когда давление паров становится равным внешнему давлению. Точка кипения раствора T_g лежит правее точки кипения чистого растворителя T_s .

Для разбавленных растворов повышение температуры кипения раствора ΔT_s пропор-

ционально молярной концентрации растворённого вещества и не зависит от природы последнего:

$$\Delta T_s = E n_2 = E \frac{g}{M},$$

где E — эбулиоскопическая константа, называемая молекулярным повышением температуры кипения; зависит от природы растворителя (для воды — 5,12, бензола — 26,7 и т. д.).

Эта формула используется для определения молекулярных весов по повышению температуры кипения раствора (эбулиоскопия):

$$M = E \frac{g}{\Delta T_s}.$$

Эбулиоскопический метод определения молекулярных весов более трудоёмкий по сравнению с криоскопическим и поэтому применяется реже.

Осмоз. Осмосом называется явление самопроизвольного перехода растворителя через полупроницаемую перегородку из более разбавленного раствора (или чистого растворителя) в более концентрированный раствор. Интенсивность осмоса характеризуется так называемым осмотическим давлением. Мерой осмотического давления является разность внешних давлений на оба раствора, способная остановить осмос.

Закон осмотического давления. Законы осмотического давления совпадают с законами идеальных газов.

$$\pi = CRT,$$

где π — осмотическое давление;

$C = \frac{n}{V}$ — разность молекулярных концентраций обоих растворов;
 R — универсальная газовая постоянная;

T — абсолютная температура.

Это уравнение оправдывается лишь для разбавленных растворов.

Растворы электролитов. Водные растворы электролитов обнаруживают ряд аномалий: ΔP , ΔT_g и ΔT_s , определённые экспериментально, оказываются больше, чем вычисленные по вышеприведённым формулам. Все эти аномалии объясняются диссоциацией электролитов в водном растворе на ионы, т. е. увеличением числа частиц по сравнению с недиссоциирующим веществом. Для того чтобы к разбавленным водным растворам электролитов могли быть применены все законы разбавленных растворов, в них должен быть введён множитель i , показывающий, во сколько раз возросло число частиц в результате электролитической диссоциации, например

$$\pi = CiRT;$$

i связано со степенью диссоциации α (доля диссоциированных молекул):

$$i = 1 + (\nu - 1)\alpha;$$

ν — число ионов, на которые диссоциирует молекула.

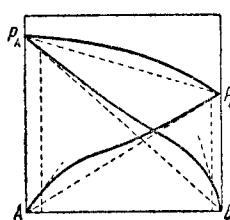
Концентрированные растворы. Концентрированные растворы не подчиняются законам

Рауля и др. Причины этого лежат в том, что во всех вышеприведённых формулах не учитываются силы взаимодействия между молекулами. Достаточно разработанной теории концентрированных растворов до сих пор нет.

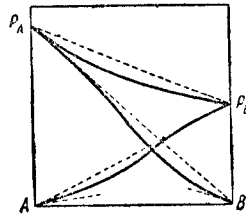
Растворы жидкостей в жидкостях

Идеальные растворы. Идеальными растворами называются растворы, строго подчиняющиеся закону Рауля (при любых концентрациях). К идеальным растворам приближаются смеси бензол — толуол, бензол — хлорбензол, метиловый и этиловый спирты и др. Вообще, идеальные растворы образуют вещества, близкие по своим химическим свойствам. На диаграмме «состав — давление» $P_A B$ и $P_B A$ кривые парциальных давлений обоих компонентов и давления смеси $P_A P_B$ в случае идеального раствора изображаются прямыми (пунктирные кривые на фиг. 11 и 12).

Отклонения реальных растворов жидкостей в жидкостях от законов идеальных растворов. Подавляющее большинство реальных растворов более или менее сильно отклоняется от закона Рауля. Наблюдаются отклонения двух типов: положительные (фиг. 11) и отрицательные (фиг. 12). Пунк-



Фиг. 11. Положительные отклонения от закона Рауля



Фиг. 12. Отрицательные отклонения от закона Рауля

тирами на фигурах обозначены кривые, отвечающие идеальным растворам.

Положительные и отрицательные отклонения качественно можно объяснить различием энергий связи между однородными и разнородными молекулами. Достаточно разработанной теории реальных растворов пока нет.

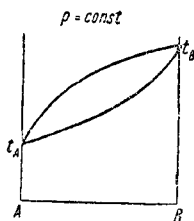
Жидкости, не растворимые друг в друге. Примерами таких жидкостей являются ртуть и вода, бензол и вода и т. д. Давление пара каждого компонента в этом случае независимо от природы другого компонента.

Жидкости, растворимые в любых отношениях. Примерами жидкостей, растворимых в любых отношениях, являются вода и спирт, два любых углеводорода, хлороформ, ацетон и др. Каждому составу такой жидкой смеси при данной температуре отвечает пар вполне определённого давления и состава, причём состав пара, как правило, более или менее сильно отличается от состава жидкости.

По характеру дистилляции и форме соответствующих ей кривых кипения растворов жидкостей, смешивающихся во всех отношениях, можно разбить на две группы:

а) растворы, не имеющие постоянной точки кипения, и б) растворы с минимальной или максимальной точкой кипения.

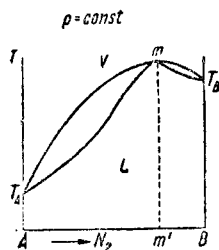
Растворы, не имеющие постоянной точки кипения. В координатах «состав (N) — давление (P)» диаграмма состояния смеси двух жидкостей, дающих такой раствор при постоянной температуре, изображается двумя кривыми — верхняя даёт зависимость упругости пара от состава жидкости, нижняя — от состава пара.



Фиг. 13. Диаграмма «состав — температура» кипения смеси двух взаимно растворимых жидкостей, не имеющих постоянной температуры кипения

В координатах «состав (N) — температура (t)» при постоянном давлении диаграмма состояния изображена на фиг. 13. Она также имеет две ветви, обращённые по сравнению с кривыми давления: верхняя — пара, нижняя — жидкости. Так как состав пара отличается от состава жидкости, находящейся с ним в равновесии, то при перегонке жидкость будет обедняться тем компонентом, который преобладает в паре. Изменение составов жидкости и пара и рост температуры будут продолжаться до полного испарения жидкости. Последние порции жидкости будут состоять практически из одного компонента — жидкости с более высокой температурой кипения.

Закон Коновалова (первый). При равновесии бинарной жидкой смеси, не имеющей



Фиг. 14. Диаграмма «состав — температура» кипения для бинарных смесей с максимальной точкой кипения

постоянной точки кипения, легколетучего компонента в паровой фазе содержится больше, чем в жидкой фазе.

Растворы с минимальной и максимальной точкой кипения. Типичная кривая кипения раствора с максимальной точкой кипения изображена на фиг. 14; с минимальной точкой кипения — на фиг. 15; общей особенностью этих кривых является совпадение составов жидкости и пара в экстремальных точках (см. Закон второй Коновалова, стр. 331). Геометрически это выражается в совпадении в экстремальной точке касательных к кривым жидкости и пара.

Дистилляция раствора любого состава с максимальной точкой кипения приводит к составу m' , отвечающему максимальной точ-

ке m . Смеси с этим составом кипят при постоянной температуре без изменения состава и потому носят название постоянно кипящих или азеотропных смесей. Примером такой смеси является водный раствор соляной кислоты (20% HCl), кипящей при 110°C . Поэтому невозможно путём дистилляции получить концентрированный раствор соляной кислоты.

Дистилляция раствора с минимальной точкой кипения приводит к одному из чистых компонентов в зависимости от того, каким компонентом богаче исходный раствор по сравнению с составом m' , отвечающим минимальной точке m . Примером такого раствора является водный раствор этилового спирта. Минимальную точку кипения $78,13^\circ \text{C}$ имеет раствор, содержащий 95,57% спирта.

Закон Коновалова (второй). В экстремальных точках кривых давления пара и температуры кипения бинарных смесей, составы жидкой и парообразной фаз одинаковы.

ПРАВИЛО ФАЗ

Гомогенная система. Гомогенной, или однородной системой, называется система, обладающая одинаковыми физическими и химическими свойствами в любом участке её. Примеры гомогенных систем: смесь газов, истинный раствор и др. Гомогенная система является однофазной (см. ниже Фазы системы).

Гетерогенная система. Гетерогенной системой называется система, состоящая из нескольких фаз (см. Фазы, стр. 331). Примеры гетерогенных систем: насыщенный раствор в присутствии кристаллов соли, вода в присутствии пара и др.

Фазы системы. Фазой называется совокупность всех гомогенных частей системы, обладающих одинаковым составом и термодинамическими свойствами и находящихся в одинаковом состоянии. Например, совокупность всех льдинок в воде при 0°C и 760 мм представляет одну фазу, несмотря на пространственную разделённость кусочков льда.

Компоненты системы. Компонентами системы называются независимые составляющие вещества её. Составляющими веществами системы называются вещества, которые могут быть извлечены из системы и существовать вне её. Число компонентов системы равно числу веществ, составляющих систему, минус число независимых реакций, могущих протекать между этими веществами при данном состоянии системы. Обратимая реакция считается одной реакцией. Например, смесь газов CO , CO_2 и O_2 при комнатной температуре является трёхкомпонентной системой, а при высокой температуре, когда уже заметно протекает реакция $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2$, — двухкомпонентной.

Степень свободы системы. Степень свободы системы F называется число термодинамических переменных системы (P , T , C_1 , C_2 , C_3 ... и т. д.), которые можно в определённых пределах произвольно изменять, не изменяя числа фаз системы. Состояние фаз при этом, конечно, будет изменяться. Си-

стема с $F = 0$ называется инвариантной, система с $F = 1$ — моновариантной, система с $F = 2$ — дивариантной и т. д.

Правило фаз даёт связь между числом степеней свободы F , числом компонентов n и числом фаз системы k :

$$F = n + 2 - k.$$

Однокомпонентные системы. Однокомпонентная система вполне определяется двумя переменными P и T . Поэтому состояние системы может быть изображено точкой на координатной плоскости $P-T$.

Для однокомпонентных систем ($n=1$) правило фаз принимает вид:

$$F = 3 - k.$$

Однокомпонентная система при числе фаз $k = 3$ — инвариантна ($F = 0$), т. е. система существует только при вполне определённых значениях P и T ; при числе фаз $k = 2$ — моновариантна ($F = 1$); произвольно может изменяться одна из двух переменных, тогда другая изменяется зависимо, например $P = f(T)$; при числе фаз $k = 1$ — дивариантна ($F = 2$); при этом обе переменные могут произвольно изменяться. Таким образом, максимальное число фаз однокомпонентной системы, которые могут одновременно существовать, равно трём. Число всех фаз, в которых может встречаться данная однокомпонентная система, может быть и больше трёх.

Диаграмма состояния воды. Фиг. 16 изображает диаграмму состояния воды в области невысоких давлений. Точка O отвечает инвариантной трёхфазной системе лёд—вода—пар, существующей только при $P = 4,579$ мм и $t = +0,0076^\circ\text{C}$, и называется тройной точкой. Изменение давления или температуры приводит к исчезновению одной фазы. Например, при нагревании исчезнет лёд, при увеличении давления исчезнет пар. Три кривые, исходящие из тройной точки, соответствуют трём возможным моновариантным двухфазным системам: AO — вода—пар, OB — лёд—пар, OC — вода—лёд. Каждая кривая является графиком функции $P = f(T)$ или $T = f(P)$. Изменение и давления и температуры приводит к исчезновению ещё одной фазы. Например, при нагревании и повышении давления в системе вода—пар исчезает пар. Три поля, заключённых между кривыми, соответствуют трём возможным дивариантным однофазным системам: поле AOB — пар, поле AOC — вода, поле BOC — лёд.

При высоких давлениях лёд может существовать в нескольких кристаллических формах, каждая из которых имеет свою область устойчивости.

Метастабильное состояние. Если осторожно охлаждать чистую воду ниже 0°C , то можно получить переохлаждённую жидкую воду. Но достаточно встряхнуть её или бросить кусочек льда (затравить), чтобы вызвать мгновенное замерзание. Такое неустойчивое состояние переохлаждённой воды называется метастабильным. Оно наблюдается и у других веществ и всегда характеризуется повышенным давлением паров по сравнению с

устойчивым состоянием. На фиг. 16 ему соответствует продолжение (пунктиром) кривой OA' в область льда. Продолжения OB в область воды не существует, так как перегреть лёд нельзя. Однако твёрдое вещество может находиться в метастабильном состоянии (см. Полиморфизм, стр. 317).

Энантиотропия и монотропия. У многих веществ встречается две и более твёрдые модификации (см. Полиморфизм, стр. 317). Явление энантиотропии состоит в том, что каждая твёрдая модификация имеет свою определённую область (температур и давлений) устойчивости. Для энантиотропии характерна обратимость превращений модификаций. Например, энантиотропия наблюдается у олова. Обычное белое олово (квадратная система) устойчиво до 18°C . Ниже 18°C устойчива ромбическая модификация олова, так называемое серое олово, обладающее большим удельным объёмом. Наблюдаемое иногда на морозе явление «оловянной чумы» заключается в превращении не устойчивого на морозе белого олова в устойчивое серое, сопровождающееся разрушением оловянных предметов.

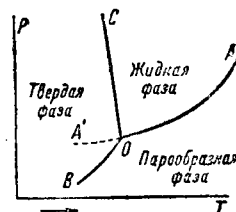
Явление монотропии состоит в том, что одна из модификаций не имеет своей области устойчивости, т. е. всегда метастабильна. Для монотропии характерна необратимость превращения модификаций.

Двухкомпонентные системы. Двухкомпонентная система вполне определяется тремя переменными — давлением P , температурой T и концентрацией одного из компонентов C . Для изображения состояния двухкомпонентной системы необходима пространственная система координат — P, T, C . Для упрощения одну переменную сохраняют постоянной и изображают изменение двух других на координатной плоскости.

Для двухкомпонентной системы ($n = 2$) правило фаз принимает вид:

$$F = 4 - k.$$

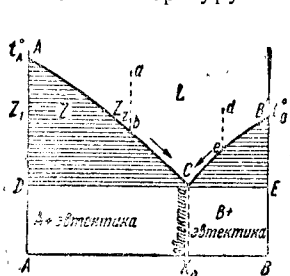
Двухкомпонентная система может быть при числе фаз $k = 4$ — инвариантна ($F = 0$); система существует только при вполне определённых значениях P, T и C . Точка, изображающая состояние этой системы в пространственной системе координат, называется четверной; при числе фаз $k = 3$ — моновариантна ($F = 1$); произвольно может изменяться одна переменная; две другие переменные изменяются зависимо от первой, например $P = f(T)$ и $C = \psi(T)$; при числе фаз $k = 2$ — дивариантна ($F = 2$); произвольно могут изменяться две переменные; третья изменяется зависимо от первых двух, например $P = f(C, T)$; при числе фаз $k = 1$ — тривариантна ($F = 3$); все три переменные могут произвольно изменяться.



Фиг. 16. Диаграмма состояния воды в области температур около 0° .

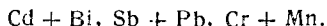
Сплавы двух металлов, не растворяющихся в твёрдой фазе. Для изображения бинарных сплавов пользуются обычно плоскостной диаграммой «состав — температура» при постоянном давлении. Типичная диаграмма плавкости для сплавов двух металлов, не растворяющихся в твёрдой фазе, дана на фиг. 17.

Прибавление одного из компонентов понижает температуру плавления другого.



Фиг. 17. Случай простой эвтектики

Кривые плавления обоих металлов встречаются в точке C , называемой эвтектической точкой (см. Эвтектика, стр. 333). Поле выше кривых плавления является областью расплавов; поле ниже прямой DE — областью твёрдых сплавов. Поля $A'CD$ и $B'CE$ называются гетерогенными, так как система, попавшая в одно из них, распадается на расплав и твёрдую фазу, например система в точке Z распадается на расплав, характеризующийся точкой Z_2 , и кристаллы чистого вещества A . Система в точках A' , B' и C инвариантна, в остальных точках кривой плавления — моновариантна и в поле расплава — дивариантна. Примеры сплавов описанного типа:



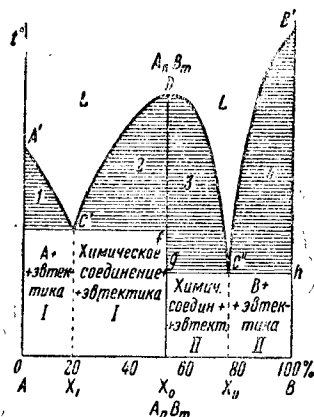
Эвтектика. Эвтектикой называется твёрдая смесь (сплав) мелких кристаллов обоих металлов состава X_0 (фиг. 17), выделяющаяся из раствора в точке C . Эвтектика бинарного сплава представляет собой две твёрдые фазы. При затверждении расплава, более богатого компонентом A по сравнению с составом эвтектики, образуется сплав, состоящий из крупных кристаллов чистого металла A , сцементированных эвтектикой (поле $ADCX_0$ на фиг. 17); для расплавов, более богатых компонентом B , — кристаллы чистого металла B , сцементированные эвтектикой (поле $BECX_0$).

Для сплава олово — свинец состав эвтектики соответствует $\text{Pb} - 37\%$, $\text{Sn} - 63\%$. Эвтектическая температура 181°C .

Благодаря низкой температуре плавления эвтектика свинца и олова применяется в качестве припоя. Состав эвтектики отвечает (приблизительно) $\frac{2}{3}$ олова и $\frac{1}{3}$ свинца по весу, поэтому сплав носит название третника.

Химические соединения в сплавах. Конгруэнтные и инконгруэнтные точки. Если металлы, входящие в бинарный сплав, образуют химическое соединение, то в кривой плавления появляются две новые ветви (фиг. 18) — DC' и DC'' , являющиеся кривыми плавления этого химического соединения в присутствии избытка одного или другого металла. Точка D — точка плавления чистого химического соединения — называется конгруэнтной точкой.

В некоторых случаях химическое соединение двух металлов устойчиво лишь в присутствии избытка одного из металлов. В этом случае кривая плавления состоит из трёх ветвей (фиг. 19): ветвь $A'C$ — кривая плавления металла A , ветвь CE — химического соединения A_nB_m и ветвь EB' — металла B . Точка E — точка превращения твёрдых фаз —

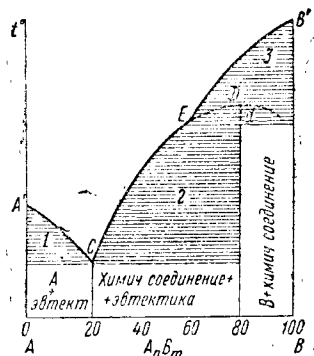


Фиг. 18. Случай образования химического соединения

называется инконгруэнтной точкой. Система в конгруэнтной и инконгруэнтной точках инвариантна.

Диаграмма сплава двух металлов может иметь несколько конгруэнтных и инконгруэнтных точек.

Диаграмма кристаллогидратов. Многие соли образуют с водой непрочные молекулярные соединения, называемые кристаллогидратами. Кривые растворимости (или плав-

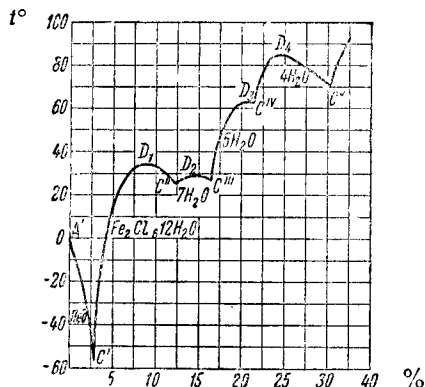


Фиг. 19. Случай образования химического соединения с инконгруэнтной точкой плавления

кости) кристаллогидратов (фиг. 20) похожи на кривые плавления бинарных сплавов металлов. Компонентами здесь являются соль и вода. Максимальные точки кривой растворимости (D_1 , D_2 , D_3 , D_4 на фиг. 20) определяют температуру плавления и состав чистых кристаллогидратов. Точки C_I , C_{II} , C_{III} , C_{IV} и C_V являются обычными эвтектическими точками. Из них C_I носит название криогидратной, а смесь льда и кристал-

логидрата, соответствующая этой точке, — криогидратной. Во всех точках *C* и *D* система инвариантна.

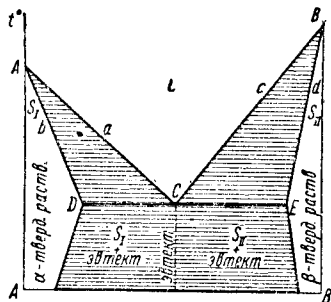
Охладительные смеси. Значительное понижение температуры плавления льда в при-



Фиг. 20. Диаграмма растворимости кристаллогидратов хлорного железа

сутствии некоторых солей (см. Диаграмма кристаллогидратов) является причиной использования смеси льда, воды и какой-либо соли в качестве охлаждающей смеси. Наиболее часто употребляется смесь льда, воды и поваренной соли.

Сплавы двух металлов, частично растворяющихся в твёрдой фазе. Типичные диаграммы плавкиости даны на фиг. 21 и 22.



Фиг. 21. Диаграмма «состав—температура» плавления сплава двух металлов, частично растворяющихся в твёрдой фазе (случай 1)

Особенностью этих систем является наличие двух областей гомогенных твёрдых растворов. В то время как в расплаве металлы смешиваются во всех отношениях, в твёрдых фазах наблюдается прерывный ряд смешанных кристаллов (твёрдых растворов). Точка *C* на фиг. 21 является эвтектической, точка *C* на фиг. 22 точкой превращения. Системы в обоих точках инвариантны.

Трёхкомпонентные системы (см. Правило фаз, стр. 331). Трёхкомпонентная система определяется четырьмя переменными: давлением *P*, температурой *T* и концентрациями двух компонентов—например *C*₁ и *C*₂. Поэтому изучение трёхкомпонентных систем представляет большие трудности.

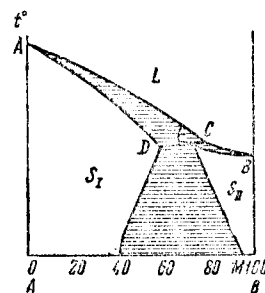
Для трёхкомпонентной системы правило фаз принимает вид:

$$F = 5 - k.$$

Инвариантная трёхкомпонентная система содержит пять фаз. Однофазная трёхкомпонентная система имеет четыре степени свободы.

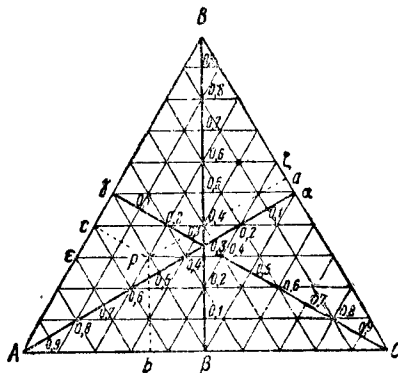
Графическое изображение трёхкомпонентных систем. Для графического изображения трёхкомпонентных систем пользуются двумя методами:

1) когда свойства двух компонентов сильно отличаются от свойств третьего, используют обычно прямоугольные координаты в пространстве, например, в случае растворов двух солей откладывают по двум осям концентрации солей и по третьей—температуру;



Фиг. 22. Диаграмма «состав—температура» плавления сплава двух металлов, частично растворяющихся в твёрдой фазе (случай 2)

2) когда свойства всех трёх компонентов сходны, пользуются методом треугольника (фиг. 23). Метод основан на свойстве равностороннего треугольника: сумма перпендикуляров, опущенных из любой точки внутри треугольника на стороны треугольника, постоянна и равна высоте треугольника. Если высоту треугольника принять за 1, то длины перпендикуляров, опущенных из какой-либо точки, могут выражать молярные доли трёх компонентов системы ($Pa - N_A$; $Pb - N_B$ и $Pc - N_C$), а сама точка будет изображать состав трёхкомпонентной системы. Состав двухкомпонентной системы изобра-



Фиг. 23. Треугольная диаграмма

зится точкой на стороне треугольника, а вершины треугольника будут отвечать чистым компонентам. В методе треугольника можно вместо перпендикуляров брать отрезки на одной из сторон треугольника, образующие-

ся при проведении через данную точку линий, параллельных сторонам треугольника, тогда (фиг. 22)

$$B\gamma = N_A; \quad A\epsilon = N_B \quad \text{и} \quad \epsilon\gamma = N_C.$$

Пользуясь методом треугольника, можно изобразить зависимость любого свойства системы от состава. Для этого из точки треугольника, изображающей состав, восстанавливают перпендикуляр, на котором откладывают численное значение данного свойства, например температуру плавления. Совокупность окончаний перпендикуляров, построенных для всех возможных составов, даёт некоторую поверхность, которая и является графическим изображением плавокости трёхкомпонентной системы. Для простоты обычно пользуются проекцией этой поверхности на плоскость треугольника.

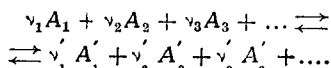
Закон распределения. Для двухфазных трёхкомпонентных систем, состоящих из двух слоёв несмешивающихся жидкостей с растворённым в них третьим веществом, установлен закон: если третье вещество имеет один и тот же молекулярный вес в обоих слоях, то при постоянной температуре и достижении равновесия отношение концентраций третьего вещества в обоих слоях (C_1 и C_2) постоянно и не зависит от абсолютной величины этих концентраций:

$$\frac{C_1}{C_2} = \text{const} \quad \text{при} \quad t = \text{const}.$$

Значительное изменение отношения с изменением концентрации третьего вещества указывает на ассоциацию его в одном из растворителей.

ХИМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ

Закон действующих масс. При постоянной температуре для обратимой реакции



в состоянии равновесия

$$\frac{C_1^{\nu_1} \cdot C_2^{\nu_2} \cdot C_3^{\nu_3} \dots}{C_1'^{\nu'_1} \cdot C_2'^{\nu'_2} \cdot C_3'^{\nu'_3} \dots} = K = \text{const};$$

ν_i — стехиометрические коэффициенты;

C_i — концентрации веществ;

K — константа равновесия, являющаяся функцией температуры и давления (при условии изменения числа молекул в результате реакции). При больших концентрациях константа равновесия начинает зависеть от концентрации, т. е. закон действующих масс для реальных систем является приближённым.

Различные выражения константы равновесия и связь между ними. Концентрация в законе действующих масс может быть выражена через молекулярно-объёмные единицы C_i :

$$K_C = \frac{C_1^{\nu_1} \cdot C_2^{\nu_2} \cdot C_3^{\nu_3} \dots}{C_1'^{\nu'_1} \cdot C_2'^{\nu'_2} \cdot C_3'^{\nu'_3} \dots};$$

через молярные доли N_i реагирующих веществ:

$$K_N = \frac{N_1^{\nu_1} \cdot N_2^{\nu_2} \cdot N_3^{\nu_3} \dots}{N_1'^{\nu'_1} \cdot N_2'^{\nu'_2} \cdot N_3'^{\nu'_3} \dots}$$

и для газовых реакций через парциальные давления P_i :

$$K_P = \frac{P_1^{\nu_1} \cdot P_2^{\nu_2} \cdot P_3^{\nu_3} \dots}{P_1'^{\nu'_1} \cdot P_2'^{\nu'_2} \cdot P_3'^{\nu'_3} \dots}.$$

Между K_C , K_N и K_P существует следующая связь:

$$K_C = K_N \cdot V^{-\Sigma \nu} = K_N \left(\frac{RT}{P} \right)^{-\Sigma \nu}$$

или

$$K_N = K_C \left(\frac{RT}{P} \right)^{\Sigma \nu};$$

$$K_C = K_P (RT)^{-\Sigma \nu},$$

или

$$K_P = K_C (RT)^{\Sigma \nu};$$

$$K_P = K_N \cdot P^{-\Sigma \nu},$$

или

$$K_N = K_P P^{-\Sigma \nu},$$

где

$$\Sigma \nu = \nu_1 + \nu_2 + \nu_3 + \dots - \nu'_1 - \nu'_2 - \nu'_3 - \dots;$$

V — объём системы;

P — давление смеси газов;

T — абсолютная температура;

R — универсальная газовая постоянная.

Если $\Sigma \nu = 0$, то

$$K_C = K_N = K_P.$$

Зависимость константы равновесия от температуры. При постоянном объёме

$$\frac{d \ln K_C}{dT} = \frac{\bar{Q}_v}{RT^2};$$

K_C — константа равновесия (см. Закон действующих масс, стр. 335);

\bar{Q}_v — тепловой эффект реакции при постоянном объёме.

Уравнение носит название уравнения изохоры реакции. При постоянном давлении

$$\frac{d \ln K_P}{dT} = \frac{\bar{Q}_p}{RT^2};$$

K_P — константа равновесия, выраженная через парциальные давления;

\bar{Q}_p — тепловой эффект реакции при постоянном давлении.

Уравнение носит название уравнения изобары реакции.

Оба уравнения могут быть проинтегрированы, если известна зависимость \bar{Q}_v и \bar{Q}_p от температуры. Для узкого интервала температур можно считать \bar{Q} постоянным; тогда интегрирование в этом интервале даёт:

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = \frac{\bar{Q}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right),$$

или

$$\lg K_2 = \lg K_1 + \frac{\bar{Q}}{4,575} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_1 \cdot T_2}.$$

Уравнение даёт возможность определить константу равновесия при данной температуре, если известны тепловой эффект реакции и константа равновесия при другой температуре, или определить тепловой эффект реакции по двум значениям константы равновесия при двух разных температурах.

Гомогенные и гетерогенные реакции. Реакция называется гомогенной, если она протекает в гомогенной, т. е. однофазной, системе. Реакция называется гетерогенной, если она протекает в гетерогенной системе, т. е. если в ней участвует несколько фаз (твёрдая, жидкая, газообразная). Для гетерогенных реакций закон действующих масс (см. стр. 335) упрощается, так как концентрации или парциальные давления паров веществ, имеющих в твёрдой или жидкой фазе, остаются постоянными в течение реакции. Так, например, для гетерогенной реакции термической диссоциации углекислого кальция $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$.

Константа равновесия

$$K_p = \frac{P_{\text{CaO}} \cdot P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CaCO}_3}}$$

принимает вид $K_p' = P_{\text{CO}_2}$, так как $P_{\text{CaCO}_3} = \text{const}$ и $P_{\text{CaO}} = \text{const}$ при $t = \text{const}$. K_p' в случае гетерогенной реакции называется упругостью диссоциации.

Константа равновесия реакции $2\text{C} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + 94,5 \text{ ккал}$.

$$K_p = \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}^2};$$

при 1000°C

$$K_p = 7 \cdot 10^{-17}.$$

Константа равновесия реакции $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2 + 136 \text{ ккал}$. Константа равновесия K_p гомогенной реакции окисления окиси углерода до углекислого газа (или реакции диссоциации углекислого газа при обратном чтении) равна:

$$K_p = \frac{\alpha^3 P}{(2+\alpha)(1-\alpha)^2} = \frac{P_{\text{CO}}^2 \cdot P_{\text{O}_2}}{P_{\text{CO}_2}^2},$$

где α — степень диссоциации углекислого газа;

P — давление в системе; вследствие малости α по сравнению с 1 до температуры 1500°C

$$K_p \approx \frac{\alpha^3 P}{2}.$$

Значения α для $P = 1 \text{ ат}$ при различных температурах:

| $T^\circ\text{K}$ | 1000° | 1200° | 1400° | 1600° | 1800° | 1900° | 2000° | 2200° | 2500° | 3000° |
|-------------------|-------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $\alpha \%$ | $2 \cdot 10^{-5}$ | $9,3 \cdot 10^{-4}$ | 0,0146 | 0,110 | 0,546 | 1,04 | 1,84 | 5,0 | 15,6 | 48,6 |

Увеличение давления смещает равновесие в сторону образования CO_2 .

Константа равновесия реакции получения водяного газа $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$. Реакция гомогенная; константа равновесия реакции

$$K_p = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P_{\text{CO}}}{P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{H}_2}}$$

для различных температур равна:

| $t^\circ\text{C}$ | 250 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| K_p | 0,15 | 0,32 | 0,56 | 0,90 | 1,25 | 1,62 |

Константа равновесия реакции $\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO} - 41,22 \text{ ккал}$. Реакция гетерогенная; играет большую роль при горении угля в топке и доменных процессах. Константа равновесия реакции K_p равна:

$$K_p = \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}^2} = \frac{1-\alpha}{4\alpha^2} \cdot \frac{1}{P},$$

где α — доля CO_2 , восстановившегося в CO ; P — общее давление в системе.

Константа равновесия реакции $\text{FeO} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{Fe} + \text{CO}_2 + 3,4 \text{ ккал}$. Реакция гетерогенная; играет большую роль в доменном процессе; константа равновесия реакции

$$K_c = K_p = \frac{P_{\text{CO}}}{P_{\text{CO}_2}} = \frac{C_{\text{CO}}}{C_{\text{CO}_2}};$$

так как $\Sigma \nu = 0$, давление не влияет на реакцию.

Химическое сродство. Реакции, протекающие между веществами, указывают на существование сродства между этими веществами. После неудачных попыток измерять сродство скоростью реакции или тепловым эффектом реакции было показано, что мерой химического сродства между веществами является максимальная полезная работа, которую может произвести реакция (полезной работой называется сумма всех работ, за исключением работы расширения).

Максимальная работа химической реакции. Максимальная работа A химической реакции $\nu_1 A_1 + \nu_2 A_2 + \dots \rightleftharpoons \nu'_1 A'_1 + \nu'_2 A'_2 + \dots$ при постоянной температуре T равна

$$A = RT \left(\ln \frac{C_1^{\nu_1} \cdot C_2^{\nu_2} \dots}{C_1'^{\nu_1} \cdot C_2'^{\nu_2} \dots} - \ln K_c \right) =$$

$$= RT \left(\ln \frac{P_1^{\nu_1} \cdot P_2^{\nu_2} \dots}{P_1'^{\nu_1} \cdot P_2'^{\nu_2} \dots} - \ln K_p \right),$$

где K_C — константа равновесия, выраженная через молекулярно-объемные концентрации;

K_p — константа равновесия, выраженная через парциальные давления;

C_i — исходная концентрация вещества A_i ;

T — абсолютная температура;

R — универсальная газовая постоянная;

ν_i — стехиометрический коэффициент вещества A_i ;

P_i — парциальное давление паров вещества A_i .

Уравнение максимальной работы или уравнение изотермы химической реакции строго применимо лишь к веществам, пары которых подчиняются законам идеальных газов, и к разбавленным растворам.

Максимальная работа химической реакции при постоянной температуре и постоянном объеме равна убыли свободной энергии системы $A = -\Delta F$.

Максимальная полезная работа химической реакции при постоянной температуре и постоянном давлении равна убыли свободной энергии при постоянном давлении (термодинамического потенциала) в системе $A = -\Delta \Phi$.

Если исходные концентрации или парциальные давления всех веществ равны единице, то уравнение максимальной работы реакции принимает вид:

$$A = -\Delta F = -RT \ln K_C;$$

$$A = -\Delta \Phi = -RT \ln K_p.$$

В этом случае A называется приведенным, или нормальным соотношением.

Тепловая теорема. На основании обоих законов термодинамики и опытных фактов о независимости термических свойств твердых кристаллических тел от температуры при температурах, близких к абсолютному нулю, сформулирована тепловая теорема, по которой

$$\left(\frac{dA}{dT}\right)_{T=0} = \left(\frac{d\bar{Q}}{dT}\right)_{T=0} = 0.$$

Уравнение выражает совпадение касательных с кривыми теплового эффекта реакции \bar{Q} и максимальной работы химической реакции A при абсолютном нуле и параллельность их оси абсцисс (T).

Уравнение максимальной работы для конденсированных систем. На основании второго закона термодинамики и тепловой теоремы уравнение максимальной работы для конденсированных систем имеет вид:

$$A = -T \int \frac{\bar{Q} \cdot dT}{T^2},$$

или, применяя формулу зависимости теплового эффекта \bar{Q} от температуры:

$$A = \bar{Q}_0 - T \int_0^T \frac{dT}{T^2} - \int_0^T \sum (\nu C_p) dT.$$

Уравнение для K_p . Применение тепловой теоремы к равновесиям в газовой фазе даёт уравнение для константы равновесия K_p :

$$\ln K_p = -\frac{\bar{Q}_{P_0}}{RT} + \frac{\sum \nu C_{P_0}}{R} \ln T + \frac{1}{R} \int_0^T \frac{\sum \nu Y_P}{T^2} dT + \sum \nu i,$$

где \bar{Q}_{P_0} — тепловой эффект реакции в паровой среде при $T=0$;

C_{P_0} — часть теплоёмкости вещества, не зависящая от температуры;

$$Y_{Pr} = \int_0^T C_{Pr} dT,$$

где C_{Pr} — часть теплоёмкости вещества, зависящая от температуры;

i — химическая постоянная, являющаяся константой интегрирования уравнения Клаузиуса — Клапейрона для упругости пара твёрдого тела;

$$\sum \nu i = \nu_1 i_1 + \nu_2 i_2 + \dots - \nu_1 i'_1 - \nu_2 i'_2 - \dots$$

Приближённое уравнение для K_p :

$$\lg K_p = -\frac{\bar{Q}_p}{4,575 T} + \sum \nu \cdot 1,75 \lg T + \sum (\nu C'),$$

где \bar{Q}_p — тепловой эффект реакции при комнатной температуре;

$\sum \nu$ — алгебраическая сумма произведений стехиометрических коэффициентов в уравнении реакции на C' — условные химические постоянные реагирующих веществ.

Третий закон термодинамики. «Если энтропию любого элемента в кристаллическом состоянии принять при абсолютном нуле за нуль, то энтропия любого чистого кристаллического вещества при абсолютном нуле температуры равна нулю, а энтропия любого другого вещества больше нуля».

Под словами «любого другого вещества» надо понимать смесь веществ, растворы, вещества в аморфном состоянии. Закон позволяет определять абсолютные значения энтропий веществ.

Определение максимальной работы реакции при помощи тепловых эффектов и энтропий. Метод основан на выражении

$$A = Z_1 - Z_2 = H_1 - H_2 + T(S_2 - S_1) = -\Delta H + T \cdot \Delta S,$$

или

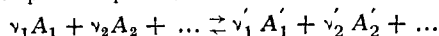
$$A = \bar{Q}_p + T \Delta S,$$

и требует знания лишь теплового эффекта реакции при постоянном давлении \bar{Q}_p , абсолютной температуре T и абсолютной энтропии S веществ системы в исходном и конечном состояниях.

Стандартные свободные энергии. Стандартной свободной энергией вещества при постоянном давлении $\Delta \Phi$ называется

максимальная работа образования моля данного вещества из простых веществ при 25° С и 1 ат, взятая с обратным знаком. Стандартная свободная энергия простых веществ принимается равной нулю. Стандартная свободная энергия важнейших соединений дана в табл. 17.

Расчёты максимальных работ при помощи таблиц стандартных свободных энергий. Так как максимальная полезная работа системы при постоянном давлении равна убыли свободной энергии — $\Delta \Phi$, то максимальная работа реакции



при стандартных условиях (25° С, 1 ат) равна

$$A = -\Delta \Phi^\circ = -(\nu_1 \Delta \Phi_{A_1}^\circ + \nu_2 \Delta \Phi_{A_2}^\circ - \dots + \nu'_1 \Delta \Phi_{A'_1}^\circ + \nu'_2 \Delta \Phi_{A'_2}^\circ + \dots).$$

Для вычисления максимальной работы при иных температурах пользуются уравнением

$$\Delta \Phi_T^\circ = \Delta \Phi_{298}^\circ - T \int_{298}^T \frac{\Delta C_p^\circ}{T} dT + \int_{298}^T \Delta C_p^\circ \cdot dT.$$

Индекс ° при $\Delta \Phi$ и ΔC_p указывает, что эти величины отнесены к стандартному давлению — 1 ат.

Активность и летучесть. Большинство уравнений физической химии (закон действующих масс, изохора и изобара реакции и др.) выведено и применимо строго лишь к идеальным системам (идеальным газам, сильно разбавленным растворам). Для того чтобы эти уравнения были строго применимы и к реальным системам, в них вместо концентрации вводят так называемую активность a , а вместо парциальных давлений — летучести f . Так, например, уравнение

$$A = -\Delta \Phi^\circ = -RT \ln \frac{f_1^{\nu_1} f_2^{\nu_2} \dots}{f_1'^{\nu_1'} f_2'^{\nu_2'} \dots}$$

является точным для реальных систем.

Активность является функцией концентрации

$$a = f_c \cdot C,$$

где f_c — коэффициент активности, меньший единицы и приближающийся к единице с уменьшением концентрации.

Летучесть является функцией давления пара. Летучесть равна давлению пара, когда пар является идеальным газом.

Активность и летучесть или их коэффициенты, соответствующие определённым концентрациям и давлениям, находят рядом методов и сводят в таблицы.

ЭЛЕКТРОХИМИЯ

Электролиз. Электролизом называется выделение веществ на поверхности электродов при прохождении тока через раствор

или расплав вещества. Отрицательный электрод называется катодом, положительный — анодом.

Электролиты. Электролитами называются вещества, растворы и расплавы которых проводят электрический ток при одновременном выделении веществ на поверхности электродов.

Электролитами являются соли, кислоты и основания. Проводимость электролитов объясняется частичной или полной диссоциацией их в растворах или расплавах на ионы — электрически заряженные частички, движение которых в электрическом поле создаёт электрический ток в электролите. Положительно заряженный ион называется катионом, отрицательно заряженный — анионом.

Законы Фарадея для электролиза. Первый закон: количество вещества m , выделившегося при электролизе, пропорционально количеству электричества q , прошедшему через электролит:

$$m = K \cdot q = KIt,$$

где I — сила тока;

t — время;

K — константа, зависящая только от природы вещества; носит название электрохимического эквивалента данного вещества; измеряется в мг/кулон, например K меди = 0,3294 мг/кулон, K серебра = 1,118 мг/кулон и т. д.

Второй закон: один и тот же ток в одно и то же время при прохождении через растворы различных веществ выделяет на электродах количества вещества, пропорциональные их химическим эквивалентам.

Следствием обоих законов Фарадея является пропорциональность электрохимического эквивалента химическому эквиваленту \mathcal{E} вещества:

$$K = 1,036 \cdot 10^{-5} \cdot \mathcal{E} = 1,036 \cdot 10^{-5} \frac{A}{n},$$

где A — атомный вес;

n — валентность.

Фарадей. Фарадеем называется электрохимическая единица количества электричества, равная 96487 абс. кулонов. При прохождении через раствор или расплав электролита одного фарадея электричества разлагается или выделяется один химический эквивалент вещества. Свободный заряд одного граммэквивалента иона равен фарадею вещества. Фарадей обозначается буквой F .

Удельная, эквивалентная и молекулярная электропроводность растворов. Удельной электропроводностью κ называется величина, обратная удельному сопротивлению ρ :

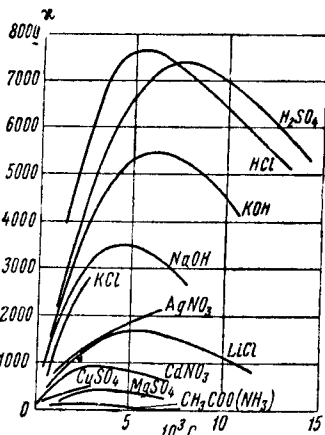
$$\kappa = \frac{1}{\rho}.$$

Удельным сопротивлением называется сопротивление столбика вещества длиной в 1 см с поперечным сечением в 1 см².

Зависимость κ растворов некоторых электролитов от концентрации их дана на фиг. 24.

С возрастанием температуры удельная электропроводность растворов электролитов увеличивается.

Эквивалентная электропроводность. Если один эквивалент электролита содержится в φ см³ раствора, то произведение удельной



Фиг. 24. Зависимость удельной электропроводности от концентрации электролита

электропроводности на φ называется эквивалентной электропроводностью λ_φ :

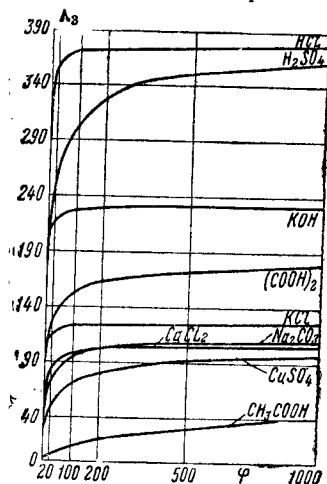
$$\lambda_\varphi = \varphi \cdot \kappa,$$

или

$$\lambda_\varphi = \frac{\kappa}{C},$$

так как $\varphi = \frac{1}{C}$, где C — эквивалентная концентрация (в $\frac{\text{молях}}{\text{см}^3}$).

Зависимость λ_φ растворов некоторых электролитов от C дана на фиг. 25.



Фиг. 25. Зависимость эквивалентной электропроводности от разведения

Молекулярная электропроводность. Если 1 моль электролита содержится в V см³ раствора, то произведение удельной электропроводности на V называется молекулярной электропроводностью λ_m :

$$\lambda_m = V \cdot \kappa,$$

Скорость движения ионов. Скоростью движения иона называется скорость его в воде при 18° в электрическом поле, падение потенциала в котором равно 1 в/см. Размерность скорости иона — см²сек⁻¹·в⁻¹. Скорости для катиона и аниона обозначают буквами U_0 и V_0 .

Подвижность ионов. Подвижностью иона (l_k — катиона, l_a — аниона) называется произведение скорости его на фарадей F :

$$l_k = F \cdot U_0 \text{ для катиона;}$$

$$l_a = F \cdot V_0 \text{ для аниона.}$$

Эквивалентная электропроводность раствора электролита при бесконечном разведении равна сумме подвижностей обоих ионов:

$$\lambda_\infty = l_k + l_a.$$

Сильные и слабые электролиты. Резкой границы между сильными и слабыми электролитами нет. Сильными электролитами называют электролиты, которые в растворах при любых концентрациях полностью диссоциированы на ионы, а потому обладают большой электропроводностью. Эквивалентная электропроводность λ — сильных электролитов — подчиняется формуле

$$\lambda = a - b \sqrt{C},$$

где C — молярная концентрация раствора; a и b — константы.

Слабыми электролитами называют электролиты, степень диссоциации которых в 0,1 N растворах меньше 0,5. Диссоциация слабых электролитов на ионы, в отличие от сильных электролитов, подчиняется закону действующих масс.

Гальванические элементы. Совокупность твердых и жидких проводников, способная давать электрический ток в замкнутой цепи за счёт химических реакций, называется гальваническим элементом. Примером гальванического элемента является элемент Даниэля, в котором в растворы CuSO_4 и ZnSO_4 , соединённые между собой, погружены медный и цинковый стержни. Электрический ток, возникающий при замыкании медного и цинкового электродов, идёт за счёт реакции



Аккумуляторы также являются гальваническими элементами.

Нормальный элемент. Так называется неполяризующийся ртутно-кадмевый гальванический элемент, принятый в качестве нормального или стандартного для различных потенциометрических измерений за его ничтожно малый температурный коэффициент э. д. с. Положительным электродом является ртуть, отрицательным — 12,5%-ная амальгама кадмия. Ртуть покрыта пастой из Hg_2SO_4 и слоем кристаллов $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Амальгама покрыта также $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Сверху в оба колена наливается насыщенный раствор CdSO_4 . При работе элемента протекает реакция $\text{Cd} + \text{Hg}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons \text{CdSO}_4 + 2\text{Hg}$.

Электродные потенциалы. При погружении металлического проводника в раствор, содержащий ионы этого металла, между

раствором и металлом устанавливается разность потенциалов, или скачок потенциала, который не совсем верно называют электродным потенциалом. Величина электродного потенциала зависит от природы веществ, образующих электрод, от концентрации раствора и температуры.

Формула для электродных потенциалов:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{RT}{nF} \ln C,$$

где ε — электродный потенциал при концентрации ионов металла в растворе, равной C моль/л;

ε_0 — электродный потенциал при $C = 1$ моль/л;

n — валентность иона металла;

F — фарадей.

Более точное выражение для электродного потенциала получается при подстановке вместо концентрации активности иона металла — a :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{RT}{nF} \ln a.$$

Для комнатных температур $2,3 \frac{RT}{F} \approx 0,058$, поэтому

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{0,058}{n} \lg C$$

и
$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{0,058}{n} \lg a.$$

Стандартные, или нормальные, потенциалы. Стандартным, или нормальным, электродным потенциалом называется скачок потенциала, образующийся между металлом и раствором ионов этого металла, концентрация (или точнее активность) которых равна единице. Эти потенциалы отнесены к нормальному водородному электродному потенциалу, принятому за нуль. Стандартные, или нормальные, потенциалы важнейших электродов при 25°С даны в табл. 19.

Газовые электроды. Газовым электродом называется электрод, образующийся в результате адсорбции газа на поверхности металла. Для поддержания постоянной степени насыщения металла газом через раствор полуэлемента пропускаются непрерывной струей пузырьки газа. Водородный электрод (см. ниже: стандартный водородный электрод) широко применяется в потенциометрии.

Стандартный водородный электрод. Стандартный, или нормальный, водородный электрод (полуэлемент) получается при погружении металлической пластины, насыщенной водородом, при давлении 1 ат в раствор кислоты с активностью водородных ионов, равной единице. При температуре 25°С потенциал стандартного водородного электрода принят условно равным нулю. При точных работах измерения производятся с разбавленной кислотой, а затем данные экстраполируются до активности ионов водорода, равной единице.

Каломельный электрод. Неудобство работы с нормальным водородным электродом

заставило избрать в качестве вторичного стандартного электрода постоянный в своих свойствах и легко воспроизводимый каломельный электрод. Каломельный электрод состоит из металлической ртути и насыщенного раствора каломели— Hg_2Cl_2 в растворе KCl . Если раствор KCl 1,0 N , каломельный электрод называют нормальным; потенциал его по условно нулевому водородному равен 0,2822 в. Если раствор KCl 0,1 N каломельный электрод называют децинормальным; потенциал его равен 0,3351 в.

Измерение электродных потенциалов. Электродные потенциалы экспериментально определяются путём измерения э. д. с. гальванического элемента, составленного из измеряемого электрода и каломельного (или нормального водородного).

Так как э. д. с. гальванического элемента E равна разности электродных потенциалов, то

$$\varepsilon_{изм} = \varepsilon_{кал} \pm E$$

(с каломельным электродом);

(+) E если $\varepsilon_{изм} > \varepsilon_{кал}$; (—) E если $\varepsilon_{изм} < \varepsilon_{кал}$, или

$$\varepsilon_{изм} = \pm E$$

(с нормальным водородным электродом, так как $\varepsilon_{H_2} = 0$);

$\varepsilon_{изм}$ — скачок потенциала измеряемого электрода;

$\varepsilon_{кал}$ — скачок потенциала каломельного электрода.

Обратимые элементы. Обратимыми называются элементы, которые обратимы по отношению к направлению тока, т. е. если через элемент пропускать ток в обратном направлении, то в нём будут протекать реакции, обратные тем, которые протекают при работе элемента, и элемент восстанавливается.

Примером обратимого элемента является элемент Даниэля.

Концентрационные цепи. Так как величина электродного потенциала зависит от концентрации ионов металла электрода (см. выше: формула для электродных потенциалов), то соединение двух одинаковых полуэлементов, отличающихся лишь концентрацией ионов металла (C_1 и C_2), в растворах образует гальванический элемент, называемый концентрационной цепью.

Э. д. с. концентрационной цепи E равна:

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1}{C_2},$$

или точнее

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_1}{a_2};$$

с учётом диффузионного потенциала

$$E = \frac{2U}{U+V} \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_1}{a_2};$$

если подвижность катиона U больше, или

$$E = \frac{2V}{U+V} \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_1}{a_2},$$

если подвижность аниона V больше (валентности катиона и аниона равны).

Выражение концентрации водородных ионов через pH. Помимо весовой и ионной концентрации водородных ионов для характеристики кислотности среды широко употребляется величина pH, которая представляет собой отрицательный десятичный логарифм концентрации водородных ионов C_{H^+} :

$$pH = -\lg C_{H^+}.$$

Пример: pH раствора, содержащего в литре 0,01 грамм-иона H ($C_{H^+} = 0,01$), равно $-\lg 0,01 = 2$.

Кислотность, нейтральность и щёлочность среды. Так как чистая нейтральная вода имеет pH = 7 ($C_{H^+} = 10^{-7}$ моль/л), то принято нейтральным называть раствор с pH = 7, кислыми — растворы с pH меньше 7 ($C_{H^+} > 10^{-7}$ моль/л), щёлочными — растворы с pH больше 7 ($C_{H^+} < 10^{-7}$ моль/л).

Потенциометрическое определение концентрации ионов. Формула для электродного потенциала

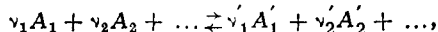
$$\epsilon = \epsilon_0 - \frac{0,058}{n} \lg C$$

даёт возможность определить концентрацию иона C по потенциалу полужлемента, образованного данным раствором и электродом, концентрацию ионов которого хотят определить в этом растворе (см. Измерение электродных потенциалов, стр. 340). Здесь ϵ_0 — стандартный, или нормальный, потенциал данного электрода, n — валентность иона металла.

Широко распространено потенциометрическое определение концентрации водородных ионов.

Химические цепи. Гальванические элементы, в которых электрическая работа производится за счёт энергии химической реакции, называются химическими цепями.

Если в элементе протекает реакция



то э. д. с. элемента E определяется выражением

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1^{\nu_1} \cdot C_2^{\nu_2} \dots}{C_1'^{\nu_1'} \cdot C_2'^{\nu_2'} \dots},$$

или точнее

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_1^{\nu_1} \cdot a_2^{\nu_2} \dots}{a_1'^{\nu_1'} \cdot a_2'^{\nu_2'} \dots},$$

где C_i — концентрация вещества A_i ;

a_i — активность вещества A_i ;

ν_i — стехиометрический коэффициент вещества A_i в уравнении реакции;

E_0 — э. д. с. химической цепи при концентрациях (или точнее активностях) всех веществ, равных единице.

Примером химической цепи является широко распространённый элемент Даниэля, в котором при работе протекает реакция



$$E_{\text{эл. Даниэля}} = E_0 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{a_{Cu^{++}}}{a_{Zn^{++}}} \approx \\ \approx E_0 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{C_{Cu^{++}}}{C_{Zn^{++}}}.$$

Диффузионный потенциал. Диффузионным потенциалом называется скачок потенциала на границе двух растворов, возникающий благодаря различию подвижностей катиона и аниона. Диффузионный потенциал $E_{\text{дифф}}$ для случая одинаковой валентности катиона и аниона и одинаковой природы обоих растворов, отличающихся только концентрацией, равен

$$E_{\text{дифф}} = \pm \frac{U - V}{U + V} \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_1}{a_2} \approx \pm \\ \pm \frac{U - V}{U + V} \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1}{C_2},$$

(+) если $U > V$ и (—) если $U < V$;

a_1 и a_2 — активности электролитов;

C_1 и C_2 — концентрации;

n — валентность ионов;

F — фарадей.

Диффузионный потенциал часто является помехой при потенциометрических измерениях, так как не может быть непосредственно измерен. Устранение (вернее значительное снижение) диффузионного потенциала достигается введением между растворами соединительного мостика из концентрированного раствора электролита, ионы которого приблизительно одинаково подвижны (например KCl, NH_4NO_3 и др.).

Поляризация и деполяризация. Возникновение при электролизе э. д. с., действующей противоположно приложенной разности потенциалов, носит название поляризации. Поляризация объясняется двумя причинами, действующими одновременно или порознь: 1) возникновением разности концентраций электролита в анодном и катодном пространстве (концентрационная поляризация); 2) изменением природы электролитов и природы поверхности электродов (химическая поляризация). Поляризация наблюдается в гальванических элементах. Сила тока I при электролизе определяется выражением:

$$I = \frac{\Delta V - E_{\text{пол}}}{R},$$

где ΔV — разность потенциалов, приложенная к электродам;

$E_{\text{пол}}$ — э. д. с. поляризации;

R — внутреннее сопротивление раствора электролита.

Уничтожение поляризации называется деполяризацией. Концентрационная поляризация значительно уменьшается интенсивным перемешиванием и нагреванием электролитического раствора. Химическую поляризацию уничтожают введением в систему деполяризаторов — веществ, химически реа-

гирующих с продуктами электролиза, вызывающими поляризацию, например MnO_2 в элементе Лекланше, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ в элементе Грене и др.

Напряжение разложения. Разложение электролита при электролизе происходит, если разность потенциалов, приложенная к электродам, превышает некоторую величину E_p , называемую напряжением разложения. Напряжение разложения зависит от природы и концентрации электролита. Напряжение разложения многих кислот и оснований $\approx 1,7$ в; напряжение разложения сульфатов и нитратов — около 2,2 в.

Перенапряжение Перенапряжением называется разность между напряжением разложения и э.д.с. поляризации.

КИНЕТИКА И КАТАЛИЗ

Скорость реакции. В качестве величины, определяющей истинную скорость химической реакции, принята отрицательная производная от концентрации C любого реагирующего вещества по времени t при условии постоянства объема:

$$v = -\frac{dC}{dt}.$$

Средняя скорость \bar{v} за отрезок времени Δt будет:

$$\bar{v} = -\frac{\Delta C}{\Delta t} = -\frac{C_1 - C_2}{t_2 - t_1},$$

где C_1 — концентрация реагирующего вещества в момент времени t_1 ;

C_2 — концентрация в момент времени t_2 .

Скорость необратимой химической реакции $\nu_1 A_1 + \nu_2 A_2 + \nu_3 A_3 + \dots \rightarrow$ пропорциональна концентрациям реагирующих веществ в данный момент времени и не зависит от концентрации продуктов реакции:

$$-\frac{dC_1}{dt} = k C_1^{\nu_1} \cdot C_2^{\nu_2} \cdot C_3^{\nu_3} \dots$$

Сумма $\Sigma \nu = \nu_1 + \nu_2 + \nu_3 \dots$ называется порядком реакции; если порядок реакции равен единице, реакция ($A \rightarrow$) называется мономолекулярной, или первого порядка; если $\Sigma \nu = 2$, реакция ($A + B \rightarrow$ или $2A \rightarrow$) называется бимолекулярной, или второго порядка, и т. д. Однако действительный порядок реакции часто не совпадает с $\Sigma \nu$, так как сложная реакция протекает по стадиям и порядок реакции будет определяться порядком наиболее медленной стадии.

Скорость необратимой мономолекулярной реакции $A \rightarrow$. Если к моменту времени t концентрация A равна C , то $-\frac{dC}{dt} = kC$.

Интегрирование этого уравнения даёт выражение для определения константы скорости k необратимой мономолекулярной реакции:

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{C_0}{C} = \frac{2,303}{t} \lg \frac{C_0}{C},$$

где C_0 — концентрация вещества A при $t = 0$;

k — константа скорости мономолекулярной реакции, имеет размерность t^{-1} .

В практических расчётах часто пользуются выражениями:

$$\frac{dx}{dt} = k(a - x)$$

и

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{a}{a-x} = \frac{2,303}{t} \lg \frac{a}{a-x},$$

где a — количество вещества A в начальный момент ($t = 0$);

x — количество вещества A , превратившееся за время t .

Время полураспада — время превращения половины количества вещества — определяется выражением:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0,6932}{k}.$$

Скорость необратимой бимолекулярной реакции $A + B \rightarrow$ определяется дифференциальным уравнением:

$$-\frac{dC}{dt} = k' C_1 C_2,$$

где C_1 — концентрация вещества A в момент времени t ;

C_2 — концентрация вещества B в момент времени t ;

k' — константа скорости.

Подстановки $\left(C_1 = \frac{a-x}{V}, C_2 = \frac{b-x}{V} \right.$ и

$\frac{dC_1}{dt} = -\frac{1}{V} \frac{dx}{dt}$) и интегрирование дают выражение константы бимолекулярной реакции:

$$k = \frac{1}{t} \cdot \frac{1}{a-b} \cdot \ln \frac{b(a-x)}{a(b-x)} = \frac{2,303}{t(a-b)} \lg \frac{b(a-x)}{a(b-x)},$$

где a — количество молей A при $t = 0$;

b — количество молей B при $t = 0$;

x — количество молей A или B , превратившихся ко времени t .

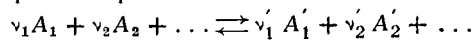
Здесь $k = \frac{k'}{V}$, т. е. константа скорости бимолекулярной реакции зависит от объема, а значит и начальной концентрации системы. Размерность

$$k' = [t^{-1} C^{-1}] = [t^{-1} M^{-1} L^3].$$

Если $a = b$, то интегрирование приводит к выражению:

$$k = \frac{1}{t} \left(\frac{1}{a-x} - \frac{1}{a} \right) = \frac{1}{t} \frac{x}{(a-x)a}.$$

Скорость обратимой реакции. Скорость обратимой реакции



определяется дифференциальным уравнением

$$-\frac{dC}{dt} = k_1 C_1^{\nu_1} C_2^{\nu_2} + \dots - k_2 C'_1{}^{\nu'_1} C'_2{}^{\nu'_2} \dots,$$

где C_i — концентрация вещества A_i ;

ν_i — стехиометрический коэффициент вещества A_i ;

k_1 — константа скорости прямой реакции (\rightarrow);

k_2 — константа скорости обратной реакции (\leftarrow).

Для мономолекулярной обратимой реакции уравнение после подстановок ($C_1 = \frac{a-x}{V}$ и $C_2 = \frac{b+x}{V}$) и интегрирования принимает вид:

$$k_1 + k_2 = \frac{1}{t} \ln \frac{B}{B-x},$$

где

$$B = \frac{k_1 a + k_2 b}{k_1 + k_2} = \frac{a - kb}{1 + k},$$

$k = \frac{k_2}{k_1}$ есть константа равновесия обратной реакции; она равна

$$k = \frac{k_2}{k_1} = \frac{a - x_{\infty}}{b + x_{\infty}}.$$

Влияние температуры на скорость реакции. Повышение температуры увеличивает скорость гомогенной реакции в 2—4 раза на каждые 10° . Отношение $\frac{k_{t+10}}{k_t}$ называется температурным коэффициентом скорости реакции (k_t и k_{t+10} — константы скорости реакции при температурах t и $t+10$).

Зависимость константы скорости реакции K от температуры T выражается уравнением

$$\ln k = -\frac{A}{R} \cdot \frac{1}{T} + B,$$

или

$$k = Ce^{-\frac{A}{RT}},$$

где A — энергия активации, представляющая собой сумму минимальных энергий сталкивающихся молекул, при которых они могут вступать в реакцию, рассчитанная на моль вещества;

B и C — константы, причём $B = \ln C$.

Исключение B из вышеприведённого уравнения и переход к десятичным логарифмам приводят к уравнению

$$\lg \frac{k_1}{k_2} = \frac{A}{2,303 R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right),$$

которое даёт возможность по известной энергии активации и константе скорости реакции при одной температуре находить константу скорости реакции при другой температуре или по константам скорости реакции при двух температурах определять энергию активации.

Катализ. Катализом называется явление изменения скорости реакции при введении в реагирующую систему постороннего вещества, не изменяющегося в результате реакции ни по составу, ни по количеству. Такие вещества называются катализаторами. Катализ может быть отрицательным (катализатор замедляет или прекращает реакцию) или положительным (катализатор

ускоряет реакцию). В первом приближении скорость гомогенной реакции пропорциональна количеству катализатора. В случае обратимой реакции катализатор одинаково ускоряет (или замедляет) прямую и обратную реакцию, не смещая тем самым положения равновесия. Явление катализа чрезвычайно распространено в органическом мире (действие различных ферментов) и находит всё более широкое применение в современной химической промышленности, например, синтез аммиака из водорода и азота (при 550° и 200 ат) в присутствии железа в качестве катализатора; контактный способ получения серной кислоты (катализаторы Pt , V_2O_5); синтез метанола из CO и H_2 в присутствии смеси окислов цинка и хрома; крекинг нефти в присутствии алюмосиликатных катализаторов; гидрогенизация ароматических и дегидрогенизация нафтенных в присутствии металлов Pt , Ni , Pd .

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Молекулярное давление. Равнодействующая молекулярных сил, действующих на молекулу, находящуюся внутри жидкости, равна нулю. Молекулы, находящиеся на поверхности жидкости, испытывают притяжение лишь от молекул, расположенных под ними, поэтому равнодействующая всех сил, действующих на молекулу, уже не равна нулю. Равнодействующая этих сил, направленная нормально к поверхности и рассчитанная на 1 см^2 (т. е. взятая для всех молекул, образующих 1 см^2 поверхности жидкости), называется молекулярным, или внутренним, давлением и измеряется в динах/см^2 или кг/см^2 .

Поверхностное натяжение. Поверхностным натяжением σ называется та работа A , которую надо затратить для того, чтобы создать единицу площади новой поверхности

S ; $\sigma = \frac{A}{S} \text{ эрг/см}^2$. Поверхностное натяжение может быть определено и как сила, действующая на единицу длины (1 см) линии, ограничивающей поверхность жидкости. Эта сила лежит в плоскости, касательной к поверхности в данной точке, и направлена по нормали к ограничивающей поверхности линии. В этом случае поверхностное натяжение выражается в динах/см . Абсолютная величина поверхностного натяжения не зависит от выбранных единиц эрг/см^2 или дин/см .

Поверхностная энергия. Поверхностный слой обладает некоторым избытком энергии по сравнению со слоем такой же толщины, расположенным внутри жидкости. Этот избыток энергии поверхностного слоя называется поверхностной энергией.

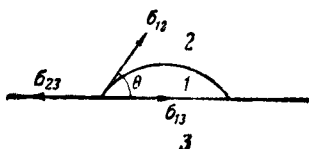
Парахор. Парахором называется величина $P = \frac{M \sigma^{1/4}}{d}$, где M — молекулярный вес жидкости; σ — её поверхностное натяжение; d — её плотность. Парахор не зависит от температуры и численно равен молекулярному объёму жидкости в условиях, когда её поверхностное натяжение равно единице. Парахор является аддитивной величиной, т. е. величиной, численное значение кото-

рой может быть сведено к сумме значений, относящихся к составным частям соединений. Для расчёта значения парахора надо сложить парахоры атомов и связей, входящих в данную молекулу (табл. 14).

Т а б л и ц а 14
Атомные и структурные парахоры Р

| Атом | Р | Атом | Р | Структура | Р |
|--------------|------|--------------|------|------------------|------|
| H | 17,1 | P | 39,7 | Связь C—C . . . | 0 |
| C | 4,8 | F | 25,7 | „ C=C | 23,2 |
| N | 12,5 | Cl | 54,3 | „ C≡C | 46,6 |
| O | 20,0 | Br | 68,0 | 3-членное | |
| О в сложных | | J | 91,0 | кольцо | 16,7 |
| эфирах . . . | 30,0 | As | 50,1 | 4-членное | |
| S | 48,2 | Hg | 69,0 | кольцо | 11,6 |
| | | | | 5-членное | |
| | | | | кольцо | 8,5 |
| | | | | 6-членное | |
| | | | | кольцо | 6,1 |

Растекание капли по поверхности твёрдого тела. Нанесённая капля жидкости, растекаясь по твёрдой поверхности, образует при этом определённый краевой угол (θ), который может изменяться от 0 до 180° (фиг. 26). На фигуре изображён случай,



Фиг. 26. Растекание капли жидкости по поверхности твёрдого тела

когда жидкость 1 смачивает твёрдое тело 3 в газовой фазе 2. На границах каждой из двух фаз существует вполне определённое поверхностное натяжение, которое может быть изображено векторами. Вектор σ_{12} — поверхностное натяжение на границе жидкость 1 — газ 2; σ_{23} — поверхностное натяжение на границе твёрдое тело 3 — газ 2; σ_{13} — поверхностное натяжение на границе жидкость 1 — твёрдое тело 3. Из фигуры легко установить условие равновесия капли. Очевидно, что изображённая капля может существовать при условии, что

$$\sigma_{23} = \sigma_{13} + \sigma_{12} \cos \theta,$$

или

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{23} - \sigma_{13}}{\sigma_{12}} = B.$$

Растекание происходит, когда $\theta < 90^\circ$ и $B > 0$; растекания нет, когда $\theta > 90^\circ$ и $B < 0$. В пределах $\theta = 90^\circ$ до 0° имеются различные градации смачивания, а в пределах от $\theta = 90^\circ$ до $\theta = 180^\circ$ различные градации несмачивания. Угол 90° является пограничным углом этих двух свойств. Случай $\theta = 0^\circ$ соответствует полному смачиванию, случай $\theta = 180^\circ$ соответствует полному несмачиванию, жидкость в этом случае собирается в шар, деформированный силой тяжести.

Капиллярное давление. Кривой поверхностный слой жидкости является источником силы, направленной от выпуклой стороны слоя к вогнутой стороне. Эта сила, рассчитанная на единицу площади поверх-

ности, называется капиллярным давлением. Капиллярное давление P можно рассчитать по формуле Лапласа, пригодной для случаев, когда поверхность жидкости имеет любую форму, допускаемую физической природой жидкого состояния. Эта формула имеет вид:

$$P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где σ — поверхностное натяжение; R_1 и R_2 — два главных радиуса кривизны, которые имеют следующее значение. В какой-нибудь точке M поверхности жидкости (фиг. 27) нужно вообразить нормаль MN и через эту нормаль провести две взаимно перпендикулярные плоскости, которые пересекут поверхность жидкости по кривым AMB и CMD . Радиусы кривизны этих кривых в точке M и обозначаются через R_1 и R_2 .

Из формулы Лапласа для плоской поверхности получается, что $P = 0$, а для шаровой поверхности $P = \frac{2\sigma}{R}$, где R — ради-

ус шара. Капиллярное давление для вогнутой поверхности является отрицательным (т. е. направлено от жидкости вне её), а для выпуклой поверхности — положительным (т. е. направлено внутрь жидкости). Это соответствует тому условию, что радиус кривизны $R > 0$, когда он направлен к центру кривизны внутри жидкости, и $R < 0$, когда он лежит вне жидкости. В случае жидкой поверхности, ограниченной твёрдыми стенками, при достаточно малых расстояниях между ними (мениск в капилляре или между двумя, расположенными близко друг к другу твёрдыми поверхностями), кривизна жидкой поверхности определяется условиями смачивания, т. е. краевым углом θ . Для капиллярной трубки с круговым сечением достаточно малого радиуса r мениск можно считать частью сферической поверхности радиуса R , определяемого по величине и по знаку выражением:

Фиг. 27. Определение главных радиусов кривизны

$$R = - \frac{r}{\cos \theta}.$$

Капиллярное давление, соответствующее такому мениску, составляет:

$$P = \frac{2\sigma}{R} = - \frac{2\sigma}{r} \cos \theta.$$

В случае, если жидкость смачивает стенки капилляра, капиллярное давление будет отрицательным, и жидкость будет подниматься по капилляру на высоту

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r \rho g},$$

где ρ — плотность жидкости; g — ускорение силы тяжести. В случае же несмачивания наблюдается опускание жидкости в капилляре по сравнению с нормальным уровнем жидкости в широком сосуде.

Зависимость поверхностного натяжения жидкости от температуры. Поверхностное натяжение жидкостей падает с увеличением температуры. Для чистых жидкостей зависимость поверхностного натяжения от температуры линейная, т. е. $\sigma_t = \sigma_0 - \gamma t$, где σ_t — поверхностное натяжение при температуре t ; σ_0 — поверхностное натяжение при 0° ; γ — постоянная величина, характерная для каждой данной жидкости.

Поверхностное натяжение растворов. При растворении одних веществ в жидкости поверхностное натяжение на границе раздела двух фаз падает, при растворении других веществ поверхностное натяжение на границе двух фаз растёт.

Поверхностно-активные вещества. Вещества, которые снижают поверхностное натяжение на границе раздела двух фаз, называются поверхностно-активными. По отношению к воде поверхностно-активными веществами являются вещества, молекулы которых содержат группы OH, COOH, CO, NH₂, NO₂ (т. е. из органических веществ спирты, кислоты, альдегиды, кетоны, амины, нитросоединения). Обычно молекулы этих веществ полярны, т. е. обладают собственным дипольным моментом.

Поверхностно-инактивные вещества. Вещества, которые повышают поверхностное натяжение на границе раздела двух фаз, называются поверхностно-инактивными. По отношению к воде поверхностно-инактивными веществами являются некоторые электролиты, например хлористый натрий.

Поверхностная активность. Способность вещества снижать поверхностное натяжение характеризуется величиной поверхностной активности $g = -\frac{d\sigma}{dC}$, где C — концентрация раствора. Поверхностная активность определяется как тангенс угла, образованного касательной к кривой зависимости поверхностного натяжения от концентрации раствора и положительным направлением оси абсцисс в точке, когда $C = 0$.

Правило Дюкло-Траубе. Способность понижать поверхностное натяжение при одинаковых концентрациях возрастает в постоянное число раз в геометрической прогрессии при переходе от одного гомолога к последующему. При обычной (комнатной) температуре поверхностная активность возрастает в 3—3,5 раза при удлинении цепи на одну CH₂ группу.

Адсорбция из растворов. Концентрация веществ, снижающих поверхностное натяжение жидкостей, в поверхностном слое (толщиной в одну молекулу) больше, чем в слое такой же толщины внутри объёма. Избыток концентрации вещества на границе раздела двух фаз, рассчитанный на единицу площади, называется адсорбцией, обозначается буквой Γ и выражается обычно в молях/см².

Уравнение Гиббса. Гиббс строгим термодинамическим путём нашёл связь между адсорбцией, температурой, поверхностным натяжением и концентрацией растворённого вещества. Уравнение Гиббса для адсорбции из разбавленных растворов имеет вид:

$$\Gamma = -\frac{1}{RT} C \frac{d\sigma}{dC},$$

где C — концентрация раствора;
 σ — поверхностное натяжение.

Теория адсорбции Лангмюра. Разработанная Лангмюром теория адсорбций применима как для адсорбции газов твёрдыми телами, так и для адсорбции из растворов. Предполагая, что на поверхности имеется n адсорбционных центров, к каждому из которых может присоединяться одна молекула газа, и что адсорбированные молекулы не действуют друг на друга, т. е. силы, действующие на молекулу газа у одного адсорбционного центра, не зависят от того, заняты соседние центры или нет, Лангмюр для адсорбции газа Γ получает следующее уравнение:

$$\Gamma = \Gamma_{\infty} \frac{P}{P + b},$$

где Γ_{∞} — предельное значение адсорбции на данной поверхности;

P — давление газа;

b — численный коэффициент, зависящий от природы газа и природы адсорбента.

Из этой формулы следует, что при малых давлениях ($P \ll b$) $\Gamma = \Gamma_{\infty} \frac{P}{b}$, т. е. Γ

пропорционально P , при больших же давлениях ($P \gg b$) $\Gamma = \Gamma_{\infty} = \text{const}$, т. е. наступает насыщение, причём на поверхности образуется насыщенный слой адсорбированного вещества толщиной в одну молекулу (насыщенный мономолекулярный слой). В случае растворов формула Лангмюра принимает вид:

$$\Gamma = \Gamma_{\infty} \frac{C}{C + a},$$

где C — концентрация раствора;

a — численный коэффициент, зависящий от природы растворённого вещества, растворителя и адсорбента.

Молекулы поверхностно-активных веществ, адсорбируясь на границе раздела двух фаз, определённым образом ориентируются так, что полярная группа обращается в сторону той из фаз, с которой имеет большее сродство. Так, например, при адсорбции поверхностно-активных веществ на границе вода—воздух или вода—бензол полярные группы обращаются в сторону воды, а неполярные группы в сторону воздуха или бензола, так что, когда заканчивается процесс адсорбции, на поверхности образуется мономолекулярный слой из ориентированных молекул. Если полярную группу молекулы изобразить кружком, а неполярную — палочкой, то насыщенный мономолекулярный слой можно представить схемой, изображённой на фиг. 28.

При исследовании адсорбции твёрдыми пористыми адсорбентами или порошками часто применяется эмпирическая формула, не имеющая теоретического обоснования:

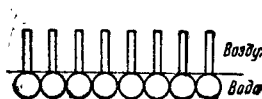
$$x = kC^{\frac{1}{n}},$$

где x — количество вещества, адсорбированного 1 г адсорбента;

C — концентрация раствора;

k и $\frac{1}{n}$ — численные коэффициенты, зависящие от природы раствора и адсорбента; эти коэффициенты находят на основании экспериментальных данных.

Формула эта выражается параболой; главный её недостаток состоит в том, что она даёт непрерывное возрастание адсорбции с концентрацией, не указывая на существование предела адсорбции. Формула даёт правильные результаты только при умеренных концентрациях.



Фиг. 28. Ориентация молекул поверхностно-активных веществ на границе двух фаз по Лангмюру

Классификация сорбционных процессов.

Сорбцией называется общий случай поглощения газа или пара пористым телом. Сорбентом называется твёрдое тело, поглощающее газ или пар.

Термин «сорбция» охватывает реальные случаи поглощения газов и паров, обычно слагающиеся из сочетания нескольких процессов различной природы.

1. Абсорбция — сорбция газа за счёт его проникновения (диффузии) в массу сорбента, приводящая к образованию твёрдого раствора. Термину «абсорбция» придаётся и более широкий смысл как процессу поглощения объёмом. Так, например, растворение газа в жидкостях называется абсорбцией газа, поглощение света веществами — абсорбцией света.

2. Адсорбция — уплотнение газа на поверхности твёрдого тела. Термину «адсорбция» придаётся и более широкий смысл как поглощению вещества поверхностью. Поэтому адсорбцией называется и избыток концентрации поверхностно-активных веществ на границе раздела жидкость — газ и жидкость — жидкость.

3. Капиллярная конденсация — сорбция пара за счёт его конденсации в порах сорбента. Это явление обусловлено понижением упругости насыщенного пара в ультрапорах (капиллярах) сорбента и является эффектом, создаваемым капиллярными силами.

4. Хемосорбция — химическое взаимодействие газа с твёрдым телом, связанное с образованием новой фазы и происходящее либо на поверхности тела, если продукты реакции покрывают поверхность хемсорбента плёнкой, не проницаемой для газа, т. е. лишённой пор, либо распространяющееся на всю массу хемсорбента. Сорбционные процессы, наблюдающиеся на опыте, являются сложными, так как обычно слагаются

Таблица 15

Давление насыщенного пара воды в мм рт. ст. (мм Hg)

| t° | p | t° | p | t° | p | t° | p |
|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|-------|
| -15 | 1,436 | 14 | 11,987 | 43 | 64,80 | 72 | 254,6 |
| -14 | 1,560 | 15 | 12,788 | 44 | 68,26 | 73 | 265,7 |
| -13 | 1,691 | 16 | 13,634 | 45 | 71,88 | 74 | 277,2 |
| -12 | 1,834 | 17 | 14,530 | 46 | 75,65 | 75 | 289,1 |
| -11 | 1,987 | 18 | 15,477 | 47 | 79,60 | 76 | 301,4 |
| -10 | 2,149 | 19 | 16,477 | 48 | 83,71 | 77 | 314,1 |
| -9 | 2,326 | 20 | 17,535 | 49 | 88,02 | 78 | 327,3 |
| -8 | 2,514 | 21 | 18,650 | 50 | 92,51 | 79 | 341,0 |
| -7 | 2,715 | 22 | 19,827 | 51 | 97,20 | 80 | 355,1 |
| -6 | 2,931 | 23 | 21,068 | 52 | 102,09 | 81 | 369,7 |
| -5 | 3,163 | 24 | 22,377 | 53 | 107,20 | 82 | 384,9 |
| -4 | 3,410 | 25 | 23,756 | 54 | 112,51 | 83 | 400,6 |
| -3 | 3,673 | 26 | 25,209 | 55 | 118,04 | 84 | 416,8 |
| -2 | 3,956 | 27 | 26,739 | 56 | 123,80 | 85 | 433,6 |
| -1 | 4,258 | 28 | 28,349 | 57 | 129,82 | 86 | 450,9 |
| 0 | 4,579 | 29 | 30,043 | 58 | 136,08 | 87 | 468,7 |
| 1 | 4,926 | 30 | 31,824 | 59 | 142,60 | 88 | 487,1 |
| 2 | 5,294 | 31 | 33,695 | 60 | 149,38 | 89 | 506,1 |
| 3 | 5,685 | 32 | 35,663 | 61 | 156,43 | 90 | 525,8 |
| 4 | 6,101 | 33 | 37,729 | 62 | 163,77 | 91 | 546,0 |
| 5 | 6,543 | 34 | 39,898 | 63 | 171,38 | 92 | 567,0 |
| 6 | 7,013 | 35 | 42,175 | 64 | 179,31 | 93 | 588,6 |
| 7 | 7,513 | 36 | 44,563 | 65 | 187,54 | 94 | 610,9 |
| 8 | 8,045 | 37 | 47,067 | 66 | 196,09 | 95 | 633,9 |
| 9 | 8,609 | 38 | 49,692 | 67 | 204,96 | 96 | 657,6 |
| 10 | 9,209 | 39 | 52,442 | 68 | 214,17 | 97 | 682,1 |
| 11 | 9,844 | 40 | 55,324 | 69 | 223,73 | 98 | 707,3 |
| 12 | 10,518 | 41 | 58,341 | 70 | 233,7 | 99 | 733,2 |
| 13 | 11,231 | 42 | 61,50 | 71 | 243,9 | 100 | 760,0 |

Таблица 16

Давление насыщенного пара некоторых органических веществ в мм рт. ст. (мм Hg)

| t° | н.-октан C_8H_{18} P | Циклогексан C_6H_{12} P | Толуол C_7H_8 P | Анилин $C_6H_5NH_2$ P | Хлороформ $CHCl_3$ P |
|-------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 0 | 2,94 | 27,55 | | | 61 |
| 10 | 5,62 | 47,05 | | | 100,5 |
| 20 | 10,45 | 76,9 | | | 159,6 |
| 30 | 18,40 | 121,3 | 36,7 | | 246,0 |
| 40 | 30,85 | 181,6 | 59,1 | | 366,4 |
| 50 | 49,35 | 269,2 | 82,6 | 2,4 | 526,0 |
| 60 | 77,55 | 385,0 | 139,5 | 5,7 | 739,6 |
| | | | | | (760 при 60,9°C) |
| 70 | 117,9 | 540,8 | 202,4 | 10,6 | 1 019 |
| 80 | 174,8 | 741,3 | 289,7 | 18,0 | 1 403 |
| | | (760 при 80,75°C) | | | |
| 90 | 253,4 | 992 | 404,6 | 29,2 | 1 880 |
| 100 | 353,6 | 1 304 | 557,2 | 45,7 | 2 430 |
| 110 | 481,9 | 1 687 | | 69,2 | 3 100 |
| 120 | 646,4 | 2 140 | | 96,6 | 3 890 |
| | (760 при 125,8°C) | | | | |
| 130 | 859 | 2 695 | | 144,5 | 4 860 |
| 140 | 1 114 | 3 355 | | 204,0 | 5 950 |
| 150 | 1 425 | 4 140 | | | 7 080 |

из нескольких одновременно протекающих процессов различной физической природы.

Теплота сорбции. При сорбции обычно происходит выделение тепла. Этот тепловой эффект является энергетическим эквивалентом работы, совершаемой сорбционными силами. Обычно экспериментально определяют выделение тепла, наблюдающееся при сорбции определённого количества газа или пара на сорбенте, тщательно освобождённом от посторонних газов. Суммарное выделившееся количество тепла Q , отвечающее установившемуся сорбционному равновесию, носит название интегральной или полной

Таблица 17

Теплоты плавления, испарения, горения, образования и стандартные свободные энергии некоторых важнейших веществ в ккал/моль

| Вещество | Формула | Теплота плавления | | Теплота испарения | | Теплота горения | Агрегатное состояние* | Теплота образования из элементов (теплосодержание) ΔH°_{298} | Стандартная свободная энергия ΔF°_{298} |
|------------------------------------|---|---------------------|-----------|---------------------|-----------|-----------------|-----------------------|---|--|
| | | $T^\circ \text{ К}$ | λ | $T^\circ \text{ К}$ | λ | | | | |
| Азот | N_2 | 63 | -0,169 | 77 | -1,336 | — | г | 0,000 | 0,000 |
| Азотная кислота | HNO_3 | 226 | -0,60 | 359,2 | -7,2 | — | ж | -41,66 | -26,5 |
| Аммиак | NH_3 | 195 | -1,84 | 240 | -5,56 | — | г | -11,04 | -3,94 |
| Анилин | $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$ | 267,2 | -1,95 | 257,2 | -10,2 | — | ж | +63,68 | +35,40 |
| Антрацен | $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ | 490,2 | -6,9 | — | — | 1684,7 | т | +16,94 | +54,5 |
| Ацетилен | C_2H_2 | 191,7 | -0,60 | 191,7 | -5,74 | 311,1 | г | +54,23 | +50,0 |
| Ацетон | $\text{CH}_3 \cdot \text{CO} \cdot \text{CH}_3$ | 179,2 | -1,14 | 329,2 | -7,27 | — | ж | -57,3 | -35,1 |
| Бензол | C_6H_6 | 278,6 | -2,350 | 352,8 | -7,39 | 782 | ж | +11,2 | +29,06 |
| Бутадиен, или дивинил | $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$ | 164,3 | -1,908 | 268,6 | -5,398 | 618,1 | г | +26,87 | — |
| н-Бутан | C_4H_{10} | 134,87 | -1,113 | 272,66 | -5,351 | 687,9 | т | -29,81 | -3,72 |
| Вода | H_2O | 273,16 | -1,437 | 373,2 | -10,571 | — | ж | -68,32 | -56,68 |
| Водород | H_2 | 11 | -0,0282 | 18 | -0,216 | — | г | 0,000 | 0,000 |
| н-Гексан | C_6H_{14} | 178,6 | -3,00 | 298,16 | -7,41 | 1002,4 | ж | -47,56 | -2 |
| н-Гептан | C_7H_{16} | 182,52 | -3,355 | 371,51 | -7,66 | 1159,4 | ж | -53,63 | -0,31 |
| Графит | C | 3873 | -11 | — | — | — | т | 0,000 | 0,000 |
| Дифенил | $\text{C}_6\text{H}_5 \cdot \text{C}_6\text{H}_5$ | 344,2 | -4,0 | — | — | 1494,73 | т | +24,8 | +61,7 |
| Едкий натр | NaOH | — | — | — | — | — | т | -102,7 | -90,8 |
| Изобутан | C_4H_{10} | 113,74 | -1,085 | 261,44 | -5,089 | 686,3 | г | -31,45 | -4,26 |
| Изооктан | C_8H_{18} | 165,79 | -2,201 | 372,33 | -7,41 | — | ж | -61,98 | 0 |
| Кислород | O_2 | 54,5 | -0,106 | 90 | -1,629 | — | г | 0,000 | 0,000 |
| Ксилол мета | $\text{C}_8\text{H}_8(\text{CH}_3)_2$ | 225,3 | -2,760 | 298,16 | -10,00 | 1089,4 | ж | -4,4 | +27,4 |
| Ксилол орто | » | 247,82 | -3,250 | 298,16 | -10,47 | 1090,4 | ж | -3,4 | +29,2 |
| Ксилол пара | » | 286,39 | -4,09 | 298,16 | -10,11 | 1089,9 | ж | -3,9 | +28,3 |
| Метан | CH_4 | 90,6 | -0,224 | 114,2 | -1,95 | 212,8 | г | -17,89 | -12,11 |
| Метиловый спирт | CH_3OH | 175,2 | -0,76 | 337,7 | -9,01 | 182,75 | ж | -57,03 | -39,96 |
| Мочевина | $\text{NH}_2 \cdot \text{CO} \cdot \text{NH}_2$ | — | — | — | — | — | т | -78,6 | -47,3 |
| Муравьиная кислота | $\text{H} \cdot \text{COOH}$ | 281,2 | -3,05 | 374,2 | -5,52 | 62,8 | ж | -99,45 | -85,2 |
| Нафталин | C_{10}H_8 | 353,2 | -4,57 | 491,2 | -9,7 | 1231,3 (20°) | т | +18,03 | +45,5 |
| Оксид кальция | CaO | 2840 | -28 | — | — | — | т | -151,7 | -141,7 |
| Оксид углерода | CO | 62 | -0,1997 | 81,5 | -1,444 | 67,61 | г | -26,39 | -32,78 |
| Серная кислота | H_2SO_4 | 283 | -2,55 | 599,2 | -1,3 | — | ж | -193,75 | -177,60 |
| Сернистый газ | SO_2 | 200 | -1,9 | 263 | -6,07 | — | г | -70,94 | -71,6 |
| Серный ангидрид | SO_3 | 290 | -1,9 | 326 | -10,3 | — | г | -94,44 | -87,0 |
| Сероводород | H_2S | 163 | -0,4 | 212 | -4,5 | — | г | -4,8 | -7,83 |
| Толуол | $\text{C}_6\text{H}_5 \cdot \text{CH}_3$ | 178,18 | -1,560 | 298,16 | -9,115 | 935,5 | ж | +1,2 | +25,6 |
| Углекислый газ | CO_2 | 217 | -2,24 | 217 | -6,0 | — | г | -94,03 | -94,24 |
| Уксусная кислота | CH_3COOH | 290,2 | -2,70 | 391,7 | -5,82 | 208,3 | ж | -116,0 | -94,5 |
| Фенантрен | $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ | 371,4 | -4,3 | — | — | 1674,9 | т | +26,74 | +64,0 |
| Фенол | $\text{C}_6\text{H}_5 \cdot \text{OH}$ | 314,2 | -2,77 | 455,3 | -10,74 | — | т | +16,55 | -11,00 |
| Формальдегид | $\text{H} \cdot \text{CHO}$ | — | — | — | — | 134,1 | г | -28,48 | -27,1 |
| Хлор | Cl_2 | 107,7 | -1,62 | 237 | -4,4 | — | г | 0,000 | 0,000 |
| Хлористый водород | HCl | 159 | -0,476 | 188 | -3,86 | — | г | -22,03 | -22,74 |
| Хлористый натрий | NaCl | 1073 | -7,22 | 1473 | -43,5 | — | т | -98,3 | -91,8 |
| Циклогексан | C_6H_{12} | 279,84 | -0,627 | 298,16 | -7,940 | 936,4 | ж | -37,68 | +6,2 |
| Циклопентан | C_5H_{10} | 179,69 | -0,144 | 298,16 | -6,983 | 783,3 | ж | -29,45 | +4,6 |
| Четырёххлористый углерод | CCl_4 | 249 | -0,67 | 196 | -7,27 | — | г | -25,6 | -16,5 |
| Этан | C_2H_6 | 89,87 | -0,682 | 184,1 | -3,325 | 372,8 | г | -20,24 | -7,83 |
| Этилен | C_2H_4 | 103,95 | -0,800 | 169,40 | -3,237 | 337,2 | г | +12,56 | +16,36 |
| Этиловый спирт | $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ | 159,2 | -1,15 | 351,4 | -10,19 | 337,06 | ж | -66,35 | -42,20 |

* г — газ
ж — жидкость
т — твердое

Растворимость и теплота растворения неорганических соединений в воде

| Название соединения | Формула | Растворимость | | Интегральная теплота растворения при ∞ разведении Q ккал/моль |
|--|---|-------------------|---|---|
| | | $t^\circ\text{C}$ | % (вес) | |
| Азота окись | NO | 20 | $\alpha = 0,04706$ | |
| Аммоний азотнокислый | NH_4NO_3 | 20 | 63,9 | 81,52 |
| Аммоний хлористый | NH_4Cl | 20 | 27,1 | 71,33 |
| Барий едкий | $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ | 20 | 3,36 | ** 237,7 |
| Барий хлористый | $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 20 | 26,3 | ** 207,69 |
| Борная кислота | H_3BO_3 | 21 | 4,9 | ** 246,3 |
| Бром | Br_2 | 19,96 | 3,45 | ** 1,2 |
| Водорода перекись | H_2O_2 | | ∞ | ** 45,0 |
| Железа гидроокись | $\text{Fe}(\text{OH})_3$ | 18 | $\cdot 4,8 \cdot 10^{-9}$ | |
| Железа закись—окись (магнетит) | Fe_3O_4 | | н. р. | |
| Железа окись (гематит) | Fe_2O_3 | | н. р. | |
| Железо хлористое | FeCl_3 | 20 | 40,7 | ** 99,83 |
| Железо хлорное | FeCl_2 | 20 | 47,9 | ** 128,2 |
| Иод | I_2 | 15 | $\cdot 0,0276$ | |
| Калий азотнокислый | KNO_3 | 20 | 24,1 | 110,19 |
| Калий хлористый (сильвин) | KCl | 20 | 25,5 | ** 99,95 |
| Кальций едкий | $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | 20 | 0,123 | ** 238,9 |
| Кальций хлористый | CaCl_2 | 20 | 42,7 | 208,8 |
| Кислород | O_2 | 20 | $\alpha = 0,03102$ | 3,3 |
| Кремния карбид (карборунд) | SiC | | н. р. | |
| Кремния окись (ангидрид кремневой кислоты) | SiO_2 | | н. р. | |
| Кремния окись (кварц) | SiO_2 | | н. р. | |
| Марганца двуокись (перекись, пиролюзит) | MnO_2 | | н. р. | |
| Медь сернокислая | $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ | 25 | 18,7 | ** 194,8 |
| Мышьяковистый ангидрид | As_2O_3 | 25 | 2,00 | ** 149,0 |
| Натрий бромистый | $\text{NaBr} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 20 | 47,5 | ** 86,212 |
| Натрий сернистый | Na_2S | 18 | 15,3 | ** 105,3 |
| Натрий углекислый (кислый) первичный | NaHCO_3 | 20 | 8,76 | ** 223,5 |
| Натрий углекислый вторичный, гидрат (сода) | $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ | 20 | 17,8 | ** 276,37 |
| Натрий хлористый | NaCl | 20 | 26,39 | 97,15 |
| Ртуть однохлористая (каломель) | Hg_2Cl_2 | 18 | $\cdot 2,1 \cdot 10^{-4}$ | |
| Ртуть двуххлористая (сулема) | HgCl_2 | 20 | 6,2 | ** 53,47 |
| Свинец азотнокислый | $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ | 20 | 34,3 | ** 100,7 |
| Свинца окись (свинцовый глёт) | PbO | 20 | $\cdot 1,7 \cdot 10^{-2}$ | |
| Свинца окись (сурик) | Pb_3O_4 | | н. р. | |
| Свинца окись (ангидрид) | PbO_2 | | оч. тр. р. | |
| Сера ромбическая | S | | н. р. | |
| Серы двуокись (сернистый ангидрид) | SO_2 | 20 | $\alpha = 39,38$ | ** 77,91 |
| Серы трёхокись | SO_3 | | ∞ | ** 139,0 |
| Сернистый водород (сероводород) | H_2S | 20 | $\alpha = 2,554$ | ** 9,88 |
| Серебро азотнокислое | AgNO_3 | 20 | 69,3 | ** 24,68 |
| Углерода окись | CO | 20 | $\alpha = 0,02319$ | 29,89 |
| Углерода двуокись (угольный ангидрид) | CO_2 | 20 | $\alpha = 0,878$ | 99,21 |
| Углерод сернистый (сероуглерод) | CS_2 | 20 | $\cdot 0,179$ | |
| Углерод четырёххлористый | CCl_4 | 20 | 0,080 | |
| Фосфористая кислота | H_3PO_3 | | оч. р. | ** 229,0 |
| Фосфорноватистая кислота | H_3PO_2 | | оч. р. | ** 141,5 |
| Фосфорная кислота мета | $(\text{HPO}_3)_x$ | | оч. р. | ** 234,7 |
| Фосфорная кислота орто | H_3PO_4 | | оч. р. | ** 306,86 |
| Фтористый водород | HF | | ∞ | ** 75,75 |
| Хлор | Cl_2 | 0 | В 1 объёме H_2O раствор 4,6 об. Cl_2 | ** 5,3 |
| Хрома окись | Cr_2O_3 | | н. р. | |
| Цинка окись | ZnO | | оч. тр. р. | |
| Цинк хлористый | ZnCl_2 | 20 | 78,6 | 115 |

Примечание. н. р. — не растворимо.

оч. р. — очень растворимо.

оч. тр. р. — очень трудно растворимо.

 α — коэффициент абсорбции — объём газа (приведённый к 0° и давлению 760 мм), поглощённый 1 объёмом жидкости при t° , когда парциальная упругость газа равна 760 мм Hg.

* Растворимость дана в граммах растворённого вещества в 100 г растворителя.

** Дана интегральная теплота растворения 1 моля вещества в больших количествах (200, 400 молей) растворителя, мало отличающаяся от интегральной теплоты при ∞ разведении.

теплоты сорбции. Её обычно относят к единице массы сорбента и выражают в калориях на грамм: $q = \frac{Q}{m}$, где m — масса сорбента.

Частная производная от интегральной теплоты адсорбции q по величине сорбции Γ при постоянной температуре называется дифференциальной теплотой сорбции

$$q_a = \left(\frac{\partial Q}{\partial \Gamma} \right)_T \text{ кал/моль.}$$

В общем случае дифференциальная теплота сорбции зависит от величины сорбции и температуры. Начальные теплоты адсорбции, соответствующие адсорбции небольших порций газов, на освобождённом от газов адсорбенте, сильно отличаются от теплот адсорбции при поглощении последующих сравнительно больших количеств. Опыт показывает, что в то время как интегральная теплота адсорбции чаще имеет значение около 10 000 кал, начальные теплоты достигают значения 30 000 — 40 000 кал, а иногда лежат ещё выше. Эти экспериментальные факты имеют большое значение при теоретическом рассмотрении адсорбционных процессов.

Таблица 19

Нормальные, или стандартные, потенциалы при 25°C (ряд напряжений)

| Электрод | Электродный процесс | E_0 в вольтах |
|---|---|--------------------|
| Li/Li ⁺ | Li → Li ⁺ + e (электрон) | +2,959 |
| Rb/Rb ⁺ | Rb → Rb ⁺ + e | +2,926 |
| K/K ⁺ | K → K ⁺ + e | +2,9284 |
| Sr/Sr ⁺⁺ | Sr → Sr ⁺⁺ + 2e | +2,92 |
| Ba/Ba ⁺⁺ | Ba → Ba ⁺⁺ + 2e | +2,90 |
| Ca/Ca ⁺⁺ | Ca → Ca ⁺⁺ + 2e | +2,76 |
| Na/Na ⁺ | Na → Na ⁺ + e | +2,7185 |
| Mg/Mg ⁺⁺ | Mg → Mg ⁺⁺ + 2e | +1,55 |
| Al/Al ⁺⁺⁺ | Al → Al ⁺⁺⁺ + 3e | +1,33 |
| Mn/Mn ⁺⁺ | Mn → Mn ⁺⁺ + 2e | +1,1 |
| Fe/Fe(OH) ₂ | Fe + 2OH ⁻ → Fe(OH) ₂ + 2e | +0,86 |
| Pt(H ₂)/OH ⁻ | 1/2 H ₂ + OH ⁻ → H ₂ O + e | +0,828 |
| Zn/Zn ⁺⁺ | Zn → Zn ⁺⁺ + 2e | +0,762 |
| Pt(Fe ⁺⁺)/Fe(OH) ₂ | Fe(OH) ₂ + OH ⁻ → Fe(OH) ₃ + e | +0,65 |

Продолжение табл. 19

| Электрод | Электродный процесс | E в вольтах |
|---|--|------------------|
| Ag/Ag(CN) ₂ ⁻ | Ag + 2CN ⁻ → Ag(CN) ₂ ⁻ + e | +0,5 |
| Fe/Fe ⁺⁺ | Fe → Fe ⁺⁺ + 2e | +0,441 |
| Pt(Cr ⁺⁺)/Cr ⁺⁺⁺ | Cr ⁺⁺ → Cr ⁺⁺⁺ + e | +0,4 |
| Cd/Cd ⁺⁺ | Cd → Cd ⁺⁺ + 2e | +0,401 |
| Tl/Tl ⁺ | Tl → Tl ⁺ + e | +0,33 |
| Pb/PbSO ₄ | Pb + SO ₄ ⁻ → PbSO ₄ + 2e | +0,31 |
| Co/Co ⁺⁺ | Co → Co ⁺⁺ + 2e | +0,29 |
| Ni/Ni ⁺⁺ | Ni → Ni ⁺⁺ + 2e | +0,231 |
| Ag/Ag J | Ag + J ⁻ → AgJ + e | +0,15 |
| Sn/Sn ⁺⁺ | Sn → Sn ⁺⁺ + 2e | +0,136 |
| Pb/Pb ⁺⁺ | Pb → Pb ⁺⁺ + 2e | +0,122 |
| Pt(H ₂)/H ⁺ | 1/2 H ₂ → H ⁺ + e | 0,000 |
| Ag/AgBr | Ag + Br ⁻ → AgBr + e | -0,10 |
| Pt(Cu ⁺)/Cu ⁺⁺ | Cu ⁺ → Cu ⁺⁺ + e | -0,17 |
| Ag/AgCl | Ag + Cl ⁻ → AgCl + e | -0,223 |
| Hg/HgCl | 2Hg + 2Cl ⁻ → Hg ₂ Cl ₂ + 2e | -0,270 |
| Cu/Cu ⁺⁺ | Cu → Cu ⁺⁺ + 2e | -0,344 |
| Cu/Cu ⁺ | Cu → Cu ⁺ + e | -0,51 |
| Pt(J ⁻)/J ₂ | 2J ⁻ → J ₂ + 2e | -0,535 |
| Pt(Fe ⁺⁺)/Fe ⁺⁺⁺ | Fe ⁺⁺ → Fe ⁺⁺⁺ + e | -0,74 |
| Hg/Hg ⁺ | Hg → Hg ⁺ + e | -0,799 |
| Ag/Ag ⁺ | Ag → Ag ⁺ + e | -0,798 |
| Hg/Hg ⁺⁺ | Hg → Hg ⁺⁺ + e | -0,86 |
| Pt(Br ⁻)/Br ₂ | 2Br ⁻ → Br ₂ + 2e | -1,065 |
| Pt(Tl ⁺)/Tl ⁺⁺⁺ | Tl ⁺ → Tl ⁺⁺⁺ + 2e | -1,2 |
| Pt(Cl ⁻)/Cl ₂ | 2Cl ⁻ → Cl ₂ + 2e | -1,359 |
| Au/Au ⁺ | Au → Au ⁺ + e | -1,5 |
| PbSO ₄ /PbO ₂ | PbSO ₄ + 2H ₂ O → PbO ₂ + 4H ⁺ + SO ₄ ⁻ + 2e | -1,74 |
| Pt(F ⁻)/F ₂ | F ⁻ → 1/2 F ₂ + e | -2,8 |

КОЛЛОИДНАЯ ХИМИЯ

Основная терминология и классификация дисперсных систем

Основные особенности коллоидных систем. Для изучения физических свойств веществ и законов их превращения в результате химических реакций необходимо иметь вещества в возможно чистом виде. Лучший метод получения веществ в чистом виде — перекристаллизация. Было обнаружено, что не все вещества способны к кристаллизации, и так как их трудно было идентифицировать, то их

мало изучали. Серьёзное внимание на эти вещества обратили в шестидесятых годах XIX в. Борщёв и Грем. Первый изученный представитель этих веществ был клей. Погречески клей называется «колла». Поэтому Грем всю группу такого типа веществ назвал коллоидами в отличие от веществ, способных к кристаллизации, которые он назвал кристаллоидами.

Грем нашёл, что все коллоиды не способны к кристаллизации, обладают очень малым осмотическим давлением, малой скоростью

диффузии и не способны к диализу. Диализом называется проникновение вещества через ультрапористые мембраны (пергамент, животный пузырь, плёнки из ацетилцеллюлозы или коллодия). Позднейшие опыты показали, что одно и то же вещество в зависимости от выбранного растворителя ведёт себя или как коллоид или как кристаллоид. Например, поваренная соль в воде ведёт себя как кристаллоид, а в бензольном растворе показывает свойства коллоида; стеариновокислый натрий в воде является типичным коллоидом, а в спиртовом растворе ведёт себя как кристаллоид. Кроме того, было установлено, что коллоидные частицы могут иметь кристаллическое строение.

Дисперсионная среда. Растворитель в коллоидной химии называется дисперсионной средой.

Дисперсная фаза. Растворённое или тонко диспергированное в растворителе вещество называется дисперсной фазой.

Золи. Жидкие коллоидные растворы называются золями. Для полной характеристики такого раствора к слову «золь» часто добавляется приставка, характеризующая природу растворителя. Например, золи, в которых растворителем является вода, называются гидрозольми; если растворитель спирт, — алкозолями; золи, в которых растворителем является органическое вещество, называются органозолями; если дисперсной средой является воздух, то такие системы называются аэрозолями.

Гели. Часто коллоидные системы бывают твёрдыми, студнеобразными, хотя дисперсионная среда их жидкая, как у золь. Такие системы называются гелями. Для полной характеристики гелей также ставится приставка, характеризующая природу растворителя. Если дисперсионной средой является вода, то такие гели называются гидрогелями.

Коллоиды как дисперсные системы. Малое осмотическое давление, малая скорость диффузии, неспособность к диализу указывает на то, что коллоидные частицы имеют размеры большие, чем молекулы соответствующих веществ, т. е. коллоидные частицы являются агрегатами атомов или молекул. Поэтому коллоиды относят к разряду дисперсных систем.

Классификация дисперсных систем по степеням дисперсности. Если линейные размеры частиц: 1) больше $0,1 \mu$, то они образуют грубодисперсные системы (суспензии и эмульсии); 2) лежат в пределах от $0,1 \mu$ до $1 m \mu$, то они образуют коллоидные системы; 3) меньше $1 m \mu$ образуют истинные растворы (молекулярно или ионнодисперсные системы).

Суспензии. Суспензией называется грубая взвесь твёрдых частиц в жидкой дисперсионной среде.

Эмульсии. Эмульсией называется грубая взвесь жидких частиц в жидкой дисперсионной среде.

Необратимые коллоиды. Необратимыми коллоидами называются такие коллоиды, которые, будучи выделенными из дисперсионной среды, при соприкосновении с ней вновь самопроизвольно не переходят в коллоидное состояние. Необратимые коллоиды делятся на два подкласса. Необратимыми коллоидами

первого подкласса называются коллоиды, не способные образовывать гели, например, коллоидные металлы, коллоидные сульфиды металлов. Необратимыми коллоидами второго подкласса называются коллоиды, способные образовывать гели, например, коллоидная кремневая кислота, гидраты окиси железа, алюминия и т. п. Все необратимые коллоиды чувствительны к действию электролитов. При добавлении электролитов они разрушаются (см. Коагуляции, стр. 352).

Обратимые коллоиды. Обратимые коллоиды — такие коллоиды, которые, будучи выделены из дисперсионной среды, при соприкосновении с ней вновь переходят в коллоидное состояние (состояние золя). Все обратимые коллоиды делятся на два подкласса: коллоиды типа желатины, набухающие в растворителе, но для образования золя требующие некоторого повышения температуры, и коллоиды типа гуммиарабика, способные непосредственно переходить в коллоидный раствор при простом соприкосновении с дисперсионной средой. Все обратимые коллоиды способны образовывать гели и мало чувствительны к действию электролитов.

Лиофобные коллоиды. Лиофобными коллоидами называются коллоиды, не способные к сольватации. Сольватацией называется уплотнение молекул чистого растворителя вокруг частиц. В частном случае, когда растворителем является вода, явление носит название гидратации. Не способные к гидратации коллоиды называются гидрофобными. Типичными лиофобными коллоидами являются необратимые коллоиды первого подкласса.

Лиофильные коллоиды. Лиофильными коллоидами называются коллоиды, способные к сольватации. В частном случае, когда растворителем является вода, способные к гидратации коллоиды называются гидрофильными. К типичным лиофильным коллоидам относятся все обратимые коллоиды.

Методы получения коллоидных систем

Дисперсионные методы

Дисперсионными методами называются все методы, при которых массивные тела тем или иным способом дробятся до размеров коллоидных частиц.

Механические методы. Механический метод состоит в прямом дроблении тел механическими приёмами. К механическим методам относятся: 1) дробление в ступке и 2) дробление в коллоидных мельницах. В обоих случаях получить высокодисперсные системы не удастся. При дроблении обязательным является добавление веществ, которые адсорбируются на образующихся частицах и препятствуют их слипанию. Такие вещества называются стабилизаторами.

Пептизация. Пептизацией называется переведение осадка в золь под действием небольших количеств электролита. Этим методом в состояние золя можно перевести только такие осадки, в которых ультрамикроны (коллоидные частицы) не потеряли своей самостоятельности. Переход в золь происходит потому, что каждая частица ад-

сорбирует на своей поверхности ионы одного и того же знака, вследствие этого между ними возникают силы отталкивания, и они равномерно распределяются по всему объёму растворителя.

Конденсационные методы

Конденсационные методы заключаются в том, что отдельные атомы или молекулы заставляют объединяться вместе в агрегаты, которые имеют коллоидные размеры.

Восстановление. Применяя неорганические или органические восстановители, можно получить из растворов солей многих металлов в воде коллоидные растворы металлов в воде. Например, действуя в щелочной среде на раствор хлорного золота в воде формалином, получают коллоидный раствор металлического золота яркокрасного цвета.

Гидролиз. Гидролизом можно получить коллоидные растворы гидратов окисей металлов (образующих слабые основания) или некоторых кислот — кремневой, оловянной.

Кристаллизация. Подбирая соответствующим образом исходные соли и растворители, можно добиться того, что рост кристаллов нерастворимых веществ, образующихся в результате обменного разложения, будет прекращаться тогда, когда их размеры будут лежать в пределах размеров коллоидных частиц.

Электрические методы

Коллоидные растворы многих веществ можно получать электрическим распылением. Вещества, подлежащие распылению, погружаются в растворитель, соединяются с источником тока — постоянного (метод Бредига) или переменного высокой частоты и напряжения (метод Сведберга) — так, чтобы между ними зажглась электрическая дуга. Тогда в результате горения дуги происходит распыление вещества с образованием коллоидного раствора.

Оптические свойства коллоидов

Вид золь в проходящем свете. При рассмотрении коллоидных растворов в проходящем свете как невооружённым глазом, так и под микроскопом они окажутся совершенно прозрачными и однородными. Предельная разрешающая сила микроскопа $0,15 \mu$, размеры же коллоидных частиц лежат в пределах от $0,1 \mu$ до 1μ , поэтому видеть коллоидные частицы под микроскопом нельзя. Свет, проходя через коллоидный раствор, частично им поглощается — поглощается. Если коллоидный раствор поглощает в видимой части спектра свет всех длин волн в одинаковой степени, то он кажется бесцветным. Когда же нацело поглощаются лучи только определённой длины волны, то золь кажется окрашенным в цвет, дополнительный поглощённому. У многих золь окраска зависит от степени дисперсности. Высокодисперсные золи окрашены в красный цвет, низкодисперсные — в фиолетовый.

Вид золь в отражённом свете. При рассмотрении золь в отражённом свете (т. е. при рассмотрении перпендикулярно падающему свету) заметно помутнение. Это явление

называется опалесценцией. При прохождении пучка света через коллоидный раствор виден его путь, если наблюдать перпендикулярно его ходу. Интенсивность рассеянного света для частиц, размер которых лежит в пределах $0,1 \mu — 1 \mu$, определяется формулой:

$$I = K \frac{nV^2}{\lambda^4},$$

где I — интенсивность рассеянного света;

V — объём частицы;

n — число частиц в единице объёма;

K — постоянная, зависящая от природы света и коллоидного раствора;

λ — длина волны света. Рассеянный свет обычно частично поляризован.

Ультрамикроскоп. Для обнаружения присутствия коллоидных частиц служит ультрамикроскоп.

Принцип устройства

ультрамикроскопа

показан на

фиг. 29. Параллельный

пучок

света A попадает

в кюветку C с коллоидным раствором.

Объектив

D и окуляр

микроскопа расположены перпендикулярно

падающему свету. Поэтому

поле зрения остаётся тёмным, и в окуляр

падают только лучи, рассеянные коллоидными

частицами. В ультрамикроскопе видны

не сами коллоидные частицы в присущей им

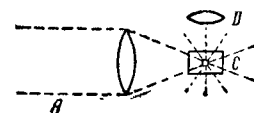
геометрической форме, а светящиеся точки,

которые являются результатом дифракции

света (дифракционные ореолы). Ультрамикроскоп

позволяет не увидеть коллоидные

частицы, а обнаружить их присутствие.



Фиг. 29. Схема ультрамикроскопа

Молекулярно-кинетические свойства коллоидов

Броуновское движение. Частицы, которые обнаруживаются при помощи ультрамикроскопа, не находятся в состоянии покоя, а совершают беспорядочное (хаотическое) движение подобно молекулам газа. Это движение было открыто броуном и получило название броуновского движения. Броуновское движение в коллоидных системах играет большую роль, так как сообщает системам кинетическую устойчивость, т. е. способность противостоять действию силы тяжести. Так как массы и плотности коллоидных частиц велики, то дисперсная фаза должна была бы оседать под действием силы тяжести. Однако этого не наблюдается, так как в результате броуновского движения частицы самопроизвольно двигаются и против силы тяжести.

Электрические свойства коллоидов

В большинстве случаев дисперсная фаза и дисперсионная среда в коллоидных системах несут электрические заряды, причём знак заряда дисперсной фазы противоположен знаку заряда дисперсионной среды.

Электрофорез. Если коллоидный раствор поместить в электрическое поле, то частицы дисперсной фазы, поскольку они несут заряд определённого знака, начинают двигаться к одному из полюсов, заряд которого противо-

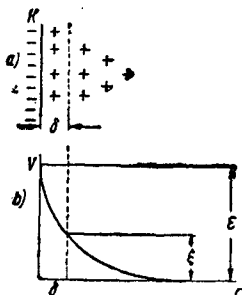
положен заряду частиц. Это движение дисперсной фазы в электрическом поле называется электрофорезом. Коллоидные металлы, сульфиды металлов, кремневая кислота, глина обычно заряжены отрицательно; поэтому в электрическом поле они двигаются к аноду. Коллоидные окиси и гидроокиси металлов обычно заряжены положительно и в электрическом поле двигаются к катоду.

Электроосмос. Электроосмосом называется движение дисперсионной среды в постоянном электрическом поле. Дисперсионная среда движется к тому электроду, заряд которого противоположен знаку заряда дисперсионной среды.

Причины возникновения заряда у коллоидных частиц. Основной причиной возникновения зарядов у коллоидных частиц является адсорбция ионов. Каждая коллоидная частица адсорбирует на своей поверхности ионы одного и того же знака и приобретает заряд, по знаку совпадающий со знаком заряда адсорбированных ионов. Ионы противоположного знака остаются в растворителе и придают ему заряд. Кроме того, заряд может возникнуть в результате деструкции кристаллической решетки коллоидных частиц ионами из раствора или же в результате диссоциации молекул, входящих в состав коллоидных частиц, на их поверхности на ионы.

Мицелла. Мицеллой называется нейтральный комплекс молекул, образующих коллоидную частицу с адсорбированными ионами и ионами-спутниками (т. е. ионами противоположного знака, оставшимися в избытке в растворителе). Вся оставшаяся жидкость называется интермицеллярной жидкостью.

Распределение потенциала у коллоидной частицы. На фиг. 30, а в сильно увеличенном виде представлена поверхность коллоидной



Фиг. 30. Распределение потенциала у коллоидной частицы

частицы K , на которой расположены адсорбированные отрицательные ионы, буквой δ отмечена толщина сольватного слоя. Часть положительных ионов попадает в этот сольватный слой, а часть диффузно распространяется в глубь жидкости. Число отрицательно заряженных ионов на поверхности частицы равно числу положительных ионов, частично попадающих в сольватный слой, а частично распространяющихся от сольватной оболочки в глубь раствора. Распределение потенциала V у коллоидной частицы в зависимости от расстояния r показано на графике фиг. 30, б. Вся разность потенциалов между коллоидной частицей и окружающей средой ϵ называется термодинамическим потенциалом. Разность потенциалов ξ между неподвижным слоем жидкости, связанным с коллоидной частицей толщиной δ (сольватным слоем), и остальной — подвижной — частью жидкости называется электрокинетическим, или дзета-по-

тенциалом. Скорость движения коллоидных частиц в электрическом поле, помимо напряжения электрического тока, вязкости и диэлектрической постоянной среды, определяется величиной ζ -потенциала.

Чем больше ζ -потенциал коллоидных частиц, тем больше между ними отталкивание.

Коагуляция коллоидных систем

Коагуляция. Процесс понижения степени дисперсности коллоидных систем называется коагуляцией.

Седиментация. Конечной стадией коагуляции является процесс выпадения вещества дисперсной фазы в осадок. Этот процесс называется седиментацией.

Коагуляция лиофобных коллоидов под действием электролитов

Коагуляцию лиофобных коллоидов можно вызвать путём прибавления электролитов. Ионы прибавляемого электролита снижают величину электрокинетического потенциала, благодаря этому уменьшаются силы отталкивания между коллоидными частицами, и они получают возможность соединиться вместе в более крупные агрегаты.

Порог концентрации. Наименьшее количество прибавленного электролита, которое вызывает процесс коагуляции, называется порогом концентрации.

Критический потенциал. Минимальный электрокинетический потенциал коллоидных частиц, при котором начинается процесс коагуляции, называется критическим потенциалом.

Изоэлектрическая точка. Наименее устойчивой система будет тогда, когда электрокинетический потенциал становится равным нулю. Это состояние коллоидной системы называется изоэлектрической точкой.

Правило значности. Для того чтобы вызвать процесс коагуляции, ионов высшей валентности требуется меньше, чем ионов низшей валентности. Соотношение между количествами ионов, вызывающими коагуляцию, редко соответствует их валентности. Если концентрацию ионов калия (K^+), вызывающую коагуляцию отрицательно заряженного коллоида, принять за единицу, то оказывается, что ионов бария (Ba^{++}) потребуется в 20 раз меньше, а ионов алюминия (Al^{+++}) в 1000 раз меньше.

Явление неправильных рядов или зон коагуляции. Явление это заключается в том, что при коагуляции некоторых зольей многовалентными ионами при постепенном приливании электролита наблюдается то коагуляция, то переход вновь в высокодисперсное состояние в результате адсорбции ионов, противоположных по знаку заряда коллоидной частицы в большом количестве, что связано с изменением знака её заряда.

Явление привыкания заключается в том, что если определённое количество электролита прибавить сразу, то наступает коагуляция, заканчивающаяся выпадением вещества в осадок. Если то же самое количество электролита прибавлять постепенно, то выпадение вещества в осадок не наблюдается.

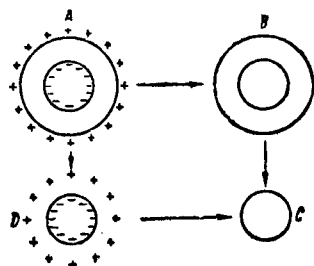
Антагонизм ионов. Ионы в смеси обычно понижают коагулирующую способность друг друга.

Быстрая и медленная коагуляция. Если к коллоидному раствору прибавлять небольшие количества электролита так, что изoeлектрического состояния не достигается, то в этом случае скорость коагуляции зависит от концентрации прибавляемого электролита: она растёт с увеличением концентрации электролита. Это — область медленной коагуляции, и только в этой области оказывается справедливым правило значности и наблюдаются явления неправильных рядов, привыкания и антагонизма ионов. Если же количество прибавляемого электролита превосходит необходимое для достижения изoeлектрического состояния, то скорость коагуляции перестаёт зависеть от концентрации электролита. Это — область быстрой коагуляции, при этом правило значности и перечисленные выше явления не наблюдаются.

Коагуляция лиофильных золей

Золи лиофильных коллоидов мало чувствительны к электролитам. Для коагуляции золя лиофильного коллоида всегда требуется больше электролита, чем для коагуляции лиофобного золя. В результате коагуляции золей лиофильных коллоидов образуются гели или в виде хлопьевидного объёмистого осадка или вся система застудневает, удерживая всю массу растворителя.

Грубая схема частицы лиофильного коллоида представлена на фиг. 31 буквой А. Если



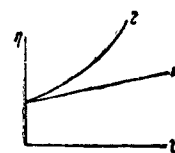
Фиг. 31. Схема коагуляции лиофильных золей

прибавлять электролит, то в первую очередь снимается заряд и частицы переходят в состояние без заряда, но с сохранением сольватной оболочки В. Коагуляции при этом не наблюдается, так как сольватная оболочка препятствует соединению частиц. Большие порции электролита разрушают сольватную оболочку (жидкость расходуется на построение сольватных оболочек ионов), и частицы переходят в состояние С, когда они лишены и заряда и сольватной оболочки. При этом наступает коагуляция. К коагуляции можно прийти и другим путём: сначала при помощи какого-нибудь подходящего реактива уничтожить сольватную оболочку и перевести частицу в состояние D. Коагуляции при этом наблюдаться не будет, так как частицы заряжены, но если теперь добавить электролит, то частицы перейдут в состояние С, при котором наступит коагуляция.

Агрегативная устойчивость коллоидных систем. Агрегативная устойчивость — это устойчивость по отношению к процессу понижения степени дисперсности. Агрегативная устойчивость лиофобных систем определяется величиной электрокинетического потенциала: чем выше электрокинетический потенциал, тем более устойчива система. Агрегативная устойчивость лиофильных систем определяется: электрокинетическим потенциалом и сольватацией.

Вязкость лиофобных коллоидов

Зависимость вязкости от концентрации. Формула Эйнштейна. Вязкость золей лиофобных коллоидов обычно мало отличается от вязкости чистого растворителя. Это объясняется тем, что лиофобные коллоиды устойчивы только в области малых концентраций. Вязкость лиофобных коллоидов изменяется линейно с концентрацией. Зависимость вязкости от концентрации даётся формулой Эйнштейна:



Фиг. 32. Зависимость вязкости лиофобных 1 и лиофильных 2 золей от концентрации

$$\eta = \eta_0 \left(1 + 2,5 \frac{\varphi}{V} \right),$$

где η — вязкость коллоидного раствора;
 η_0 — вязкость дисперсионной среды;
 φ — суммарный объём дисперсной фазы;
 V — объём раствора.

Зависимость вязкости золя лиофобного коллоида от его концентрации δ изображена на фиг. 32 кривой 1.

Зависимость вязкости лиофобных коллоидов от степени дисперсности. Вязкость золя лиофобного коллоида с увеличением степени дисперсности обычно растёт.

Зависимость вязкости от времени. С течением времени вязкость золей лиофобных коллоидов падает, так как со временем идёт процесс коагуляции.

Зависимость вязкости от температуры. Вязкость золей лиофобных коллоидов с повышением температуры падает, так как падает вязкость чистого растворителя.

Зависимость вязкости от присутствия электролитов. Под действием электролитов вязкость золей лиофобных коллоидов падает, так как происходит процесс коагуляции, в конечном итоге приводящий к выделению вещества в осадок.

Вязкость лиофильных коллоидов

Зависимость вязкости от концентрации. Вязкость лиофильных коллоидов растёт с увеличением концентрации. Многие лиофильные коллоиды уже при небольших концентрациях переходят в состояние геля. Последние обладают очень высокой вязкостью. Поэтому вязкость резко увеличивается с концентрацией (фиг. 32, кривая 2).

Зависимость вязкости от времени. С течением времени вязкость золей лиофильных коллоидов растёт, так как в растворе образуется определённая внутренняя структура,

приводящая в конечном счёте к образованию геля.

Зависимость вязкости от температуры. С повышением температуры вязкость зольей лиофильных коллоидов падает, так как разрушается внутренняя структура раствора и уменьшается вязкость растворителя.

Зависимость вязкости от присутствия электролитов. В одних случаях вязкость зольей лиофильных коллоидов при небольших концентрациях прибавляемого электролита падает, а затем по мере увеличения концентрации электролита начинает резко расти. Это объясняется тем, что малые концентрации электролита разрушают внутреннюю структуру раствора вследствие пептизации, а затем при больших концентрациях электролита наступает коагуляция, и вязкость начинает расти. В других случаях вязкость при прибавлении электролита сразу начинает расти.

Структурная вязкость. Золи многих лиофильных коллоидов имеют определённую внутреннюю структуру. Для того чтобы заставить такой золь течь, требуется приложить определённую силу. Течение начинается тогда, когда напряжение сдвига превзойдёт некоторую определённую величину. Закон Пуазейля, по которому скорость истечения растёт с увеличением давления линейно, при этом не выполняется; скорость истечений растёт пропорционально давлению степени, большей единицы. Коэффициент вязкости в этом случае оказывается функцией градиента скорости, причём с ростом градиента скорости вязкость падает. Вязкость в этих случаях называется структурной.

Эмульсии

Условия образования устойчивых эмульсий. Для образования устойчивой эмульсии из двух взаимно нерастворимых жидкостей необходимо присутствие третьего вещества, так называемого стабилизатора или эмульгатора. Эмульгатор всегда является поверхностно-активным веществом. Адсорбируясь на границе раздела двух фаз — частица эмульсии/дисперсионная среда, эмульгатор тем самым снижает поверхностное натяжение и, следовательно, уменьшает запас свободной поверхностной энергии, делая тем самым систему устойчивой. Однако не всегда вещества, сильно снижающие поверхностное натяжение, являются хорошими эмульгаторами. Вещество должно не только снижать вследствие адсорбции поверхностное натяжение, но и образовавшаяся адсорбционная плёнка вокруг капелек эмульсии должна обладать высокой поверхностной прочностью (сопротивлением на разрыв). Поэтому хорошие эмульгаторы обычно имеют коллоидную природу и способны к сольватации, при этом они образуют наиболее прочные адсорбционные слои. Кроме того, на устойчивость эмульсий значительное влияние оказывает заряд частиц эмульсии: чем он выше, тем более устойчива эмульсия.

Коалесценция. Разрушение эмульсии, приводящее к расслаиванию, т. е. к отделению обеих жидкостей, называется коалесценцией. Самопроизвольное расслаивание эмульсии называется автокоалесценцией.

Тип эмульсии. Дисперсионной средой в эмульсиях всегда является та жидкость, в которой хорошо растворимо поверхностно-активное вещество. Например, если поверхностно-активное вещество хорошо растворимо в воде, но плохо в масле, то образуется эмульсия типа масла в воде ($M-B$), т. е. дисперсной фазой является масло, а дисперсионной средой — вода. Если же поверхностно-активное вещество хорошо растворимо в масле, но плохо в воде, то образуется эмульсия воды в масле ($B-M$).

Методы разрушения эмульсии. Эмульсии могут быть разрушены: а) центрифугированием; б) нагреванием; в) в результате длительного стояния; г) путём пропускания постоянного тока в случае, если дисперсная фаза несёт электрический заряд (электрофорез); д) под действием переменного тока высокой частоты и напряжения; е) под действием поверхностно-активных веществ, обладающих большей поверхностной активностью, чем эмульгатор, но меньшей поверхностной прочностью; ж) под действием поверхностно-активных веществ, образующих другой тип эмульсии, т. е. хорошо растворимых в дисперсной фазе, при этом при определённой концентрации добавленного вещества происходит разрушение эмульсии, а при больших концентрациях — так называемая инверсия фаз, т. е. образуется эмульсия, по типу обратная той, которая была вначале.

Гели и их свойства

Основные пути получения гелей. Существует два основных пути получения гелей: а) коагуляция зольей лиофильных коллоидов: так называемое желатинирование; б) поглощение сухим веществом растворителя с образованием геля; этот процесс носит название набухания.

Желатинирование. Желатинированию лиофильных коллоидов способствуют: а) повышение концентрации дисперсной фазы; б) понижение температуры; в) время; г) электролиты, причём главную роль в этом процессе играют анионы, которые могут быть расположены в определённый ряд (лиотропный ряд), в котором каждый предшествующий анион действует желатинирующим образом сильнее, чем предыдущий: $SO_4^{2-} > C_6H_5O_7^{3-} >$

$> C_6H_5O_4^{2-} > CH_3COO^- > Cl^- > ClO_4^- > NO_3^- >$
 $> Br^- > J^- > CNS^-$.

Набухание есть процесс поглощения сухим веществом, представляющим собой высушенный гель, растворителя, связанный с увеличением объёма вещества.

Эластичные и неэластичные гели. Первые при потере растворителя уменьшаются в объёме до тех пор, пока не получится совершенно сухое вещество, способное при новом действии на него растворителя набухать и превращаться в первоначальный гель; поэтому такие гели называются ещё набухающими. Неэластичные гели при потере жидкости уменьшаются в объёме до известной величины, после чего потеря жидкости уже не сопровождается заметным изменением объёма. Последующее погружение высохшего геля в растворитель хотя и влечёт за собой

проникновение этого последнего в капиллярные пустоты, пронизывающие гель, но это поглощение жидкости уже не связано с заметным изменением объема геля; такие гели называются ещё ненабухающими. Набухающие, или эластичные, гели способны поглощать жидкость только определенной природы. Так, например, желатина набухает в воде, но не набухает в спирте; резина набухает в бензине, но не набухает в воде.

Предельно или ограниченно набухающие гели поглощают растворитель только до определенного предела, причём количество поглощенной жидкости зависит от её природы. Примером ограниченно набухающего геля являются резина, желатина и др.

Беспредельно или неограниченно набухающие гели поглощают постепенно всё большее и большее количество растворителя и затем переходят в состояние золя. Превращаясь в золь, они могут иметь любую концентрацию. Примером является гуммиарабик, некоторые белки, каучук.

Явления, сопровождающие набухание. Суммарный объем вещества и растворителя в результате набухания сокращается. В результате набухания выделяется теплота (теплота набухания). Набухающее тело оказывает давление на встречаемые им препятствия. Это давление называется давлением набухания.

Факторы, влияющие на набухание. Давление на систему набухающее вещество — растворитель способствует набуханию. Повышение температуры увеличивает скорость набухания. Анионы по своему действию на процесс набухания можно так же, как и в случае желатинирования, расположить в ряд. Но так как процесс набухания является обратным желатинированию, то ряд надо расположить в обратном порядке.

Структура гелей. Внутренняя структура гелей очень сложна. В большинстве случаев гели имеют сетчатое строение, т. е. отдельные ультрамикронные соединяются вместе, образуя нити, перепутанные между собой, и в пространстве между этими нитями заключен растворитель, содержащий примеси, сопутствующие гелю, а также не связанные между собой мицеллы. По механическим свойствам гели занимают промежуточное положение между жидкостями и твердыми телами.

Тиксотропия. Тиксотропией называется свойство многих гелей после механического перемешивания становиться жидкотекучими, т. е. переходить в золи, а после выдерживания в спокойном состоянии вновь затвердевать, восстанавливая упругие свойства геля. Процесс этот вполне обратимый и может быть повторен много раз. Тиксотропными свойствами обладают: гидрат окиси железа, содержащий количество электролита, недостаточное до полной коагуляции, гели окиси алюминия, глины (бентониты), некоторые белки.

Синерезис. Всякий гель с течением времени разрушается — стареет. Одним из процессов, связанных со старением геля, является процесс сжатия геля с отделением жидкой фазы, представляющей собой золь с небольшой концентрацией дисперсной фазы. Этот процесс называется синерезисом.

Таблица 20

Важнейшие константы по Р. Т. Барджу (1941 г.)

| Константа | Обозначение и величина |
|--|---|
| Число Авогадро . . | $N=6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹ |
| Заряд электрона . . | $e=4,80 \cdot 10^{-10}$ CGSE = $=1,602 \cdot 10^{-20}$ CGSM |
| Удельный заряд электрона | $\frac{e}{m} = 1,759 \cdot 10^{17}$ CGSM г ⁻¹ = $=5,273 \cdot 10^{17}$ CGSE г ⁻¹ |
| Постоянная Планка . | $h=6,62 \cdot 10^{-27}$ э. сек |
| Масса электрона . . | $m=9,106 \cdot 10^{-28}$ г |
| Масса атома водорода (H ₁) | $M_H = 1,6733 \cdot 10^{-24}$ г |
| Масса протона . . . | $M_p = 1,6724 \cdot 10^{-24}$ г |
| Масса α-частицы . . | $M_\alpha = 6,644 \cdot 10^{-24}$ г |
| Отношение массы атома водорода к массе электрона . . | $\frac{M_H}{m} = 1837,5$ |
| Отношение массы протона к массе электрона | $\frac{M_p}{m} = 1836,5$ |
| Энергия 1 абс. вольт-электрона в эргах | $E_0=1,6020 \cdot 10^{-12}$ э |
| Энергия в калориях на моль для 1 электрон-вольта на молекулу | 23,052 ккал·моль ⁻¹ |
| Постоянная закона смещения Вина . . | $A=0,28791$ см·град |
| Вторая радиационная постоянная . . | $C_2=1,4384$ см·град |
| Постоянная закона Стефана-Больцмана . . | $\sigma=5,672 \cdot 10^{-5}$ э.см ⁻² град ⁻⁴ сек ⁻¹ |
| Число Ломмита . . | $n_0=2,687 \cdot 10^{-19}$ см ⁻³ |
| Скорость света . . . | $C=2,99776 \cdot 10^{10}$ см·сек ⁻¹ |
| Гравитационная постоянная | $g=6,670 \cdot 10^{-8}$ дин·см ² ·г ⁻² |
| Ускорение силы тяжести (стандартное значение) | $g_0=980,665$ см·сек ⁻² |
| То же на широте 45° | $g_{45}=980,616$ см·сек ⁻² |
| Стандартная атмосфера | $A_0=1,013246 \cdot 10^6$ дин·см ⁻² ·атм ⁻¹ |
| 45°-ная атмосфера . . | $A_{45}=1,013195 \cdot 10^6$ дин·см ⁻² ·атм ⁻¹ |
| Литр (= 1 000 мл. литр) | $l=1000,028$ см ³ |
| Объем 1 моля идеального газа (0° С; 1 А.) | $V_0=22,4146 \cdot 10^3$ см ³ ·атм·моль ⁻¹ = $=22,4140$ л·атм·моль ⁻¹ |
| Механический эквивалент теплоты . . | $J_{15}=4,1855$ абс. дж. кал ⁻¹ |
| Температура плавления льда по абсолютной шкале | $T_0=273,16^\circ$ К |
| Газовая постоянная на 1 моль | $R_0=8,3143 \cdot 10^7$ э.град ⁻¹ ·моль ⁻¹ = $=1,9664$ кал ₁₅ ·град ⁻¹ ·моль ⁻¹ = $=8,2054$ л·атм·моль ⁻¹ |
| Отношение единиц физической и химической шкал | $r=1,00027$ |
| Постоянная Фарадея (по химической шкале) | $F=96501$ межд. кул. г. экв ⁻¹ = $=96487$ абс. кул. г. экв ⁻¹ = $=9648,7$ CGSM г. экв ⁻¹ |
| Постоянная Фарадея (по физической шкале) | $F=96514$ абс. кул. г. экв ⁻¹ = $=9651,4$ CGSM г. экв ⁻¹ |
| Плотность ртути (0°; A ₀) | $D_0=13,5950$ г·см ⁻³ |

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

- Бродский А. И. Физическая химия. Т. 1—2. М., Госхимиздат, Т. 1. Свойства материи. Химическая термодинамика. 6-е изд., 1948, 488 с. Т. 2. Растворы, электрохимия, химическая кинетика, фотохимия. 6-е изд., 1948, 491—998 с.
- Глинка Н. Л. Общая химия. 4-е изд., М.—Л., Госхимиздат, 1948, 605 с.
- Думанский А. В. Учение о коллоидах. 3-е изд., М.—Л., Гостехиздат, 1948, 416 с.
- Липатов С. М. Физико-химия коллоидов. М.—Л., Госхимиздат, 1948, 372 с.
- Мейделе в Д. И. Основы химии. Т. 1—2. 13-е изд., М.—Л., Госхимиздат, 1947. Т. 1, 624 с. Т. 2, 708 с.
- Некрасов Б. В. Курс общей химии. 8-е изд., М.—Л., Госхимиздат, 1948, 1008 с.
- Павлов В. А. Курс органической химии. М., Госхимиздат, 1943, 501 с.
- Песков Н. П. и Александрова-Прейс Е. М. Курс коллоидной химии. 2-е изд., М.—Л., Госхимиздат, 1948, 384 с.
- Раковский А. В. Введение в физическую химию. М., ГОНТИ. Ред. Хим. лит-ры, 1938, 677 с.
- Раковский А. В. Курс физической химии. М., Госхимиздат, 1939, 544 с.
- Семат Г. Введение в атомную физику. Пер. с англ. М., Гос. изд. иностр. лит-ры, 1948, 439 с.
- Техническая энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин. Т. I—X. М., Советская энциклопедия, 1929—1936, 10 т.
- Федулов И. Ф. Учебник физической химии. 2-е изд., М.—Л., Госхимиздат, 1946, 296 с.
- Чичибабин А. Е. Основные начала органической химии. Вып. 1—2, М.—Л., Госхимтехиздат, 1932.
- Шорыгин П. И. Курс органической химии. М. Л., Гос. научн.-техн. изд. хим. лит-ры, 1940, 563 с.
- Шпольский Э. В. Атомная физика. М.—Л., Гостехиздат, 1944, 674 с.

МЕХАНИКА



ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Механика представляет собой учение об общих законах движения физических тел. Движение является неотъемлемым свойством материи, и все происходящие в окружающем нас мире явления и процессы представляют собой различные формы движения материи.

Механика занимается изучением простейшей формы движения материи — так называемого механического движения, т. е. изменения положения тела в пространстве с течением времени.

В основе классической механики лежат законы, изложенные в точном и законченном виде Ньютоном в его «*Philosophiæ naturalis principia mathematica*» в 1687 г.*. Эти законы представляют собой обобщение тех многочисленных фактов, относящихся к области механики, которые постепенно в течение многих веков накопило человечество в результате непосредственных наблюдений, опыта и производственной деятельности. Хотя возникшая в первой четверти XIX века теория относительности произвела коренные принципиальные изменения и в области физики, и в области механики, и отвергла законы классической механики, однако классическая механика сохраняет своё значение и в настоящее время. Это объясняется тем, что, как показывают опыт и вычисления, количественные расхождения между выводами классической механики и новой механики, основанной на теории относительности, становятся существенными лишь при изучении таких явлений, где наблюдаются движения с очень большими скоростями, близкими к скорости света

($3 \cdot 10^{10}$ км/сек); при скоростях же, далёких от скорости света, эти расхождения настолько незначительны, что ими вполне можно пренебречь. Поэтому классическая механика и в настоящее время является той теоретической базой, на которой строятся все прикладные технические дисциплины и производятся все технические расчёты.

Механика делится обычно на три основных раздела — статику, кинематику и динамику. Статика есть отдел механики, посвящённый изучению условий равновесия механических систем. Кинематика занимается изучением движения механических систем с геометрической точки зрения, независимо от сил, действующих на эти системы. Предметом динамики является установление и изучение связи между движением механических систем и действующими на них силами.

При измерении величин пользуются двумя общепринятыми системами единиц: или физической системой (система CGS) или технической системой единиц (система MKS). В физической системе основными единицами являются: единица длины — сантиметр (см), единица массы — грамм-масса (г) и единица времени — секунда (сек.). В технической системе основными единицами являются: единица длины — метр (м), единица силы — килограмм (кг) и единица времени — секунда (сек.). Все другие единицы, служащие для измерения различных величин, являются в обеих системах производными от трёх указанных основных единиц. В механике принята техническая система единиц.

СТАТИКА

СИЛЫ С ОБЩЕЙ ТОЧКОЙ ПРИЛОЖЕНИЯ

Сложение сил. Абсолютно твёрдым телом называют такое тело, расстояния между точками которого постоянны; следовательно, форма и размеры такого тела остаются неизменными. В твёрдом теле силу можно переносить вдоль линии её действия, т. е. сила, приложенная к твёрдому телу, является скользящим вектором.

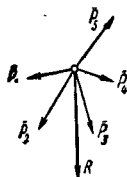
* Русский перевод этого сочинения сделан акад. А. Н. Крыловым.

Две силы \vec{P}_1 и \vec{P}_2 , приложенные в одной точке твёрдого тела, можно заменить приложенной в той же точке равнодействующей силой \vec{R} , равной по направлению и величине диагонали параллелограмма, построенного на силах \vec{P}_1 и \vec{P}_2 (фиг. 1) (закон параллелограмма сил).

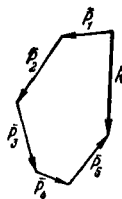
Если несколько сил $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3, \vec{P}_4, \vec{P}_5$ (фиг. 2, а) приложены в одной точке твёрдого тела или если линии действия сил пересекаются в одной точке, то эти силы мож-

но привести к одной равнодействующей, которая проходит через общую точку приложения всех сил. Это можно сделать, складывая данные силы последовательно по правилу параллелограмма или построением силового многоугольника (фиг. 2, б), причём вектор, соединяющий начало первой силы с концом последней (замыкающая сторона многоугольника), представляет собой равнодействующую данных сил (правило силового многоугольника). Последовательность, в которой складываются силы, не имеет при этом никакого влияния на конечный результат.

При аналитическом способе определения равнодействующей силы выбирают прямоугольную систему координат с началом в общей точке приложения всех данных сил и проектируют эти силы на направления трёх координатных осей.



Фиг. 2а



Фиг. 2б

Проекции равнодействующей:

$$R_x = R \cos \alpha = \sum P_i \cos \alpha_i = \sum X_i;$$

$$R_y = R \cos \beta = \sum P_i \cos \beta_i = \sum Y_i;$$

$$R_z = R \cos \gamma = \sum P_i \cos \gamma_i = \sum Z_i.$$

Величина равнодействующей определяется, как диагональ параллелепипеда:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2},$$

а её углы с осями координат определяются из равенств:

$$\cos \alpha = \frac{R_x}{\sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}};$$

$$\cos \beta = \frac{R_y}{\sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}};$$

$$\cos \gamma = \frac{R_z}{\sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}}.$$

Равновесие сил. Условие равновесия сил с общей точкой приложения состоит в том, чтобы их равнодействующая R равнялась нулю, т. е. чтобы многоугольник этих сил замыкался сам собой; аналитически это условие выражается так:

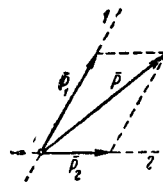
$$\sum X_i = 0; \sum Y_i = 0; \sum Z_i = 0$$

(сумма проекций всех сил на каждую из координатных осей равна нулю).

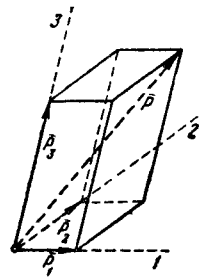
Разложение силы. Задача разложения данной силы \bar{P} по двум заданным направлениям 1 и 2, лежащим с ней в одной плос-

кости, имеет единственное решение и решается построением параллелограмма, стороны которого имеют заданные направления 1 и 2 и диагональ которого является данной силой \bar{P} (фиг. 3).

По трём направлениям 1, 2, 3, не лежащим в одной плоскости, сила \bar{P} может быть разложена единственным образом. Эту задачу можно решить аналогично предыдущей — построением параллелепипеда, рёбра которого имеют заданные направления и диагональ которого является данной силой \bar{P} (фиг. 4).



Фиг. 3

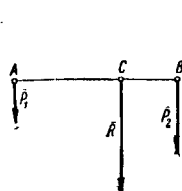


Фиг. 4

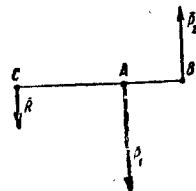
Разложение силы \bar{P} по трём или более заданным направлениям, лежащим с ней в одной плоскости, или более чем по трём заданным направлениям, не лежащим в одной плоскости, является уже задачей неопределённой.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ СИЛЫ

Сложение параллельных сил. Если линии действия двух данных сил \bar{P}_1 и \bar{P}_2 , приложенных к твёрдому телу, параллельны, причём эти силы направлены в одну сторону, то такие две силы приводятся к одной равнодействующей силе R , величина которой равна арифметической сумме данных сил, т. е. $R = P_1 + P_2$ (фиг. 5). Линия действия



Фиг. 5



Фиг. 6

силы R параллельна линиям действия данных сил и делит расстояние между ними на части, обратные пропорциональные этим силам, т. е. $\frac{AC}{CB} = \frac{P_2}{P_1}$. Если силы \bar{P}_1 и \bar{P}_2 на-

правлены в разные стороны (антипараллельны) и не равны по величине, то в этом случае их равнодействующая равна по величине их разности и направлена в сторону большей силы (фиг. 6). Линия действия этой равнодействующей делит расстояние AB в отношении $\frac{P_2}{P_1}$ внешним образом; следова-

тельно, предыдущая пропорция имеет место и в этом случае, но точка C лежит вне отрезка AB , за большей силой. Из этой пропорции получаем (в обоих случаях) следующие равенства:

$$\frac{AC}{P_2} = \frac{CB}{P_1} = \frac{AB}{R},$$

откуда

$$AC = \frac{P_2}{R} AB \text{ и } CB = \frac{P_1}{R} AB.$$

Если две антипараллельные силы равны по величине, т. е. $P_1 = -P_2$, то они образуют пару сил. Такие две равные по величине антипараллельные силы не могут быть приведены к одной равнодействующей силе, т. е., другими словами, пара сил не имеет равнодействующей.

Легко решается и обратная задача: данную силу R разложить на две параллельные ей составляющие силы, линии действия которых должны проходить через две заданные точки A и B . Так как линии действия искоемых составляющих сил известны, то остаётся найти только их величину. Поскольку точки A и B заданы, то расстояния AB , AC и CB будут известны (точка C есть точка пересечения линии действия силы R с прямой AB), а потому из вышеуказанных пропорций находим

$$P_1 = \frac{CB}{AB} R \text{ и } P_2 = \frac{AC}{AB} R.$$

Если к твёрдому телу приложены несколько параллельных сил, направленных в одну сторону, то последовательным сложением эти силы приводятся к одной равнодействующей силе, параллельной данным силам, направленной в ту же сторону и равной по величине их арифметической сумме. Система параллельных сил, из которых одни направлены в одну сторону, а другие — в противоположную сторону, приводится или к одной равнодействующей силе, равной по величине алгебраической сумме всех данных сил, или к одной паре (в этом случае алгебраическая сумма всех данных сил равна нулю), или находится в равновесии, т. е. приводится к двум силам, равным по величине и направленным по одной прямой в противоположные стороны.

Центр параллельных сил. Центром данной системы параллельных сил называется такая точка, через которую проходит линия равнодействующей этих сил и положение которой зависит только от величины данных параллельных сил и от точек их приложения, но не зависит от их направления. Следовательно, если фиксировать точки приложения и величину данных параллельных сил, а изменять только направление этих сил, сохраняя, однако, их параллельность, то равнодействующая этих сил, изменяя своё направление, будет проходить через одну и ту же точку — центр этих параллельных сил. Если параллельные силы представляют собой веса материальных частиц данного тела, то центр таких параллельных сил называется центром тяжести этого тела.

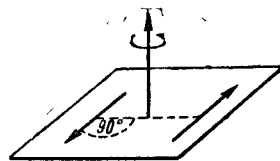
Координаты центра параллельных сил C определяются по формулам:

$$x_c = \frac{\sum P_i x_i}{\sum P_i}; y_c = \frac{\sum P_i y_i}{\sum P_i}; z_c = \frac{\sum P_i z_i}{\sum P_i}.$$

В этих формулах x_i, y_i, z_i обозначают координаты точек приложения данных параллельных сил, а величины P_i этих сил берутся в алгебраическом значении, т. е. силы, направленные в одну сторону, считаются положительными, а силы, направленные в противоположную сторону, — отрицательными.

МОМЕНТЫ

Момент пары. Преобразование пар. Моментом данной пары называется вектор, равный по величине произведению величины одной из сил пары на плечо этой пары, т. е. на расстояние между линиями действия сил пары. Этот вектор направлен по перпендикуляру к плоскости пары в ту сторону, с которой наблюдатель, смотрящий с конца этого вектора на пару, видел бы обе силы пары направленными против часовой стрелки относительно середины плеча этой пары (фиг. 7). Что касается точки приложения этого вектора (его начала), то эта точка может быть выбрана произвольно, т. е. момент пары есть вектор свободный.



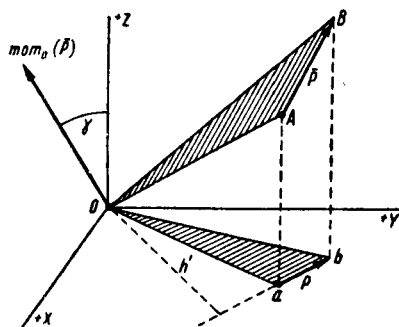
Фиг. 7

Эффект действия пары на данное твёрдое тело вполне определяется её вектором-моментом. Отсюда следует: 1) если две пары имеют равные векторы-моменты (т. е. равные по величине, параллельные и направленные в одну сторону), то эти пары эквивалентны, т. е. производят на данное твёрдое тело одинаковое действие и потому могут быть заменены одна другой; 2) не изменяя действия данной пары на тело, можно производить всякие преобразования этой пары, при которых её вектор-момент остаётся неизменным. Поэтому данную пару можно как угодно перемещать в её плоскости; пару можно переносить в другую плоскость, параллельную плоскости этой пары; величину сил и плеча данной пары можно изменять, но так, чтобы величина её момента оставалась неизменной.

Сложение пар. Если к данному твёрдому телу приложена система пар, как угодно расположенных в пространстве, то эти пары всегда можно привести к одной равнодействующей паре, момент которой равен геометрической сумме моментов данных пар; следовательно, операция сложения пар приводится к сложению по правилу многоугольника их векторов-моментов. Если (в частном случае) все данные пары лежат в одной плоскости, и их моменты параллельны, то в этом случае они складываются алгебраически, причём моменты, направленные в одну сторону, считаются положительными, а моменты, направленные

в противоположную сторону, — отрицательными. Если сумма векторов-моментов данных пар равна нулю, то такие пары уравновешиваются.

Момент силы относительно точки. Если к телу приложена сила \vec{P} , изображаемая вектором \vec{AB} , и дана какая-нибудь точка O (фиг. 8), то момент этой силы относительно точки O , подобно моменту пары, изображается в виде вектора. Этот вектор приложен в точке O и направлен по перпендикуляру к плоскости треугольника OAB в ту сторону, чтобы наблюдатель, смотрящий с конца этого вектора на этот треугольник, видел силу \vec{P} направленной против часовой стрелки относительно точки O . Величина (модуль) этого вектора равна произведению



Фиг. 8

величины данной силы на её плечо относительно точки O , т. е. на длину h перпендикуляра, опущенного из точки O на линию действия силы P (на высоту треугольника OAB), следовательно $|\text{mom}_O(\vec{P})| = Ph = 2 \text{ площ. } OAB$.

Если к данному телу приложена система сил \vec{P}_i , приводящаяся к одной равнодействующей силе \vec{R} , то момент этой равнодействующей относительно любой точки O равен геометрической сумме моментов сил \vec{P}_i относительно той же точки (теорема Вариньона), т. е.

$$\text{mom}_O(\vec{R}) = \sum \text{mom}_O(\vec{P}_i).$$

Если силы P_i лежат в одной плоскости, то их моменты относительно какой-нибудь точки, лежащей в той же плоскости, направлены по одной прямой, и потому в этом случае эти моменты складываются алгебраически, причём моменты сил, направленных относительно данной точки против часовой стрелки, считаются положительными, а моменты сил, направленных по часовой стрелке, — отрицательными.

В случае пары сил геометрическая сумма моментов сил этой пары относительно любой точки O есть величина постоянная, равная вектору-моменту этой пары, т. е.

$$\text{mom}(\vec{P}_1 - \vec{P}) = \text{mom}_O(\vec{P}) + \text{mom}_O(-\vec{P}).$$

Момент силы относительно оси. Кроме момента силы относительно точки в механике приходится рассматривать также мо-

мент силы относительно оси; чтобы найти момент силы \vec{P} относительно данной оси z (фиг. 8), нужно спроектировать эту силу на плоскость, перпендикулярную к этой оси, например на плоскость Oxy , и величину p полученной проекции умножить на длину h' перпендикуляра, опущенного на линию этой проекции из точки пересечения O оси z с этой плоскостью, т. е.

$$\text{mom}_z(\vec{P}) = h'p = 2 \text{ площ. } Oab.$$

При этом момент считается положительным, если для наблюдателя, смотрящего с положительного конца данной оси, проекция силы P на плоскость, перпендикулярную к этой оси, будет направлена против часовой стрелки относительно точки пересечения данной оси с этой плоскостью; в противном случае момент считается отрицательным; следовательно, момент силы относительно оси есть скалярная алгебраическая величина. Если сила и данная ось лежат в одной плоскости, то момент силы относительно этой оси равен нулю, так как в этом случае или $p = 0$ (сила параллельна оси), или $h' = 0$ (линия действия силы пересекает ось).

Аналитически моменты силы \vec{P} относительно координатных осей x, y, z определяются по формулам:

$$\text{mom}_x(\vec{P}) = yZ - zY; \quad \text{mom}_y(\vec{P}) = zX - xZ;$$

$$\text{mom}_z(\vec{P}) = xY - yX,$$

где x, y, z обозначают координаты точки приложения данной силы, а X, Y, Z — проекции этой силы на координатные оси.

Для осевых моментов, так же как и для моментов сил относительно точки, имеет место теорема Вариньона, т. е.

$$\text{mom}_x(\vec{R}) = \sum \text{mom}_x(\vec{P}_i).$$

Если обозначим угол вектора $\text{mom}_O(\vec{P})$ с положительным направлением оси z через γ (фиг. 8), то проекция этого вектора на ось z будет равна

$$|\text{mom}_O(\vec{P})| \cos \gamma = 2 \text{ площ. } OAB \cos \gamma.$$

Но треугольник Oab есть проекция треугольника OAB на плоскость xOy , перпендикулярную к оси z , а потому

$$2 \text{ площ. } OAB \cos \gamma = 2 \text{ площ. } Oab = \text{mom}_z(\vec{P}).$$

Следовательно,

$$|\text{mom}_O(\vec{P})| \cos \gamma = \text{mom}_z(\vec{P}),$$

т. е. проекция вектора-момента силы относительно данной точки на какую-нибудь ось, проходящую через эту точку, равна моменту этой силы относительно той же оси.

Если к данному твёрдому телу, которое может вращаться вокруг неподвижной оси, приложена система сил \vec{P}_i , то для равновесия такого тела необходимо, чтобы алгебраическая сумма моментов сил \vec{P}_i относительно оси вращения тела равнялась нулю.

Этим условием равновесия твёрдого тела, могущего вращаться вокруг неподвижной оси, часто пользуются в задачах статики, например в задачах, относящихся к случаю равновесия рычага.

ПЛОСКАЯ СИСТЕМА СИЛ

Приведение системы сил к данному центру. Пользуясь возможностью переноса точки приложения силы по линии действия этой силы и правилом параллелограмма, систему сил, лежащих в одной плоскости, можно привести к одной равнодействующей силе или к одной паре сил.

Однако при изучении плоской системы сил обычно пользуются другим методом, который называется приведением системы сил к данному центру.

Нужно иметь в виду, что силу, как скользящий вектор, можно переносить только вдоль линии её действия.

При параллельном переносе силы \vec{P} в другую точку (в положение P_1), находящуюся на расстоянии d от линии действия силы \vec{P} , получается добавочная пара, момент которой равен $M = Pd$ (фиг. 9).

Этой вспомогательной теоремой и пользуются при применении метода приведения системы сил к данному центру, который состоит в следующем: выбирают произвольную точку O , лежащую в плоскости данной системы сил и называемую центром приведения, и переносят все силы параллельно самим себе в эту точку, причём при переносе каждой силы получается добавочная пара, момент которой равен моменту этой силы относительно выбранного центра приведения. Все перенесённые силы складывают по правилу многоугольника и приводят к одной силе \vec{R} , называемой главным вектором данной системы сил. Складывая далее все добавочные пары, приводят их к одной паре, момент которой M_0 называется главным моментом данной системы сил относительно центра O . При этом:

$$\vec{R} = \sum \vec{P}_i;$$

$$R_x = \sum X_i; R_y = \sum Y_i \text{ и } M_0 = \sum \text{мом}_0(\vec{P}_i) = \sum (x_i Y_i - y_i X_i).$$

Условия равновесия плоской системы сил. Если плоская система сил находится в равновесии, то главный вектор этой системы и её главный момент будут равны нулю; следовательно:

$$\sum X_i = 0; \sum Y_i = 0 \text{ и } \sum (x_i Y_i - y_i X_i) = 0.$$

Эти три условия равновесия плоской системы сил можно выразить в другой форме, приравняв нулю сумму моментов всех сил системы относительно каждой из трёх произвольно выбранных точек, не лежащих на одной прямой.

Очень часто при решении задач статики, когда из двух опорных реакций известно направление только одной из них, удобно пользоваться следующей теоремой: *если три*

непараллельные силы находятся в равновесии, то линии этих сил пересекаются в одной точке. Опорные реакции определяются в этом случае из того соображения, что на основании указанной теоремы линия равнодействующей всех заданных сил и линии действия двух опорных реакций должны пересекаться в одной точке и что многоугольник этих трёх сил должен быть замкнутым.

Пример. На фиг. 10 изображена схема крана. Опорная реакция R_B верхнего подшипника направлена горизонтально; через точку O пересечения заданной силы \vec{Q} и опорной реакции \vec{R}_B должна проходить линия опорной реакции \vec{R}_A ; этим определяется направление силы \vec{R}_A . Величины R_A и R_B определяются затем из силового треугольника.

При аналитическом способе решения этой задачи нужно написать три условия равновесия всех сил, приложенных к крану. Направляя координатную ось y по AB , а ось x — перпендикулярно к AB , проектируя затем все силы на эти оси и составляя сумму моментов всех сил относительно точки A , получают следующие три уравнения:

$$X_A - R_B = 0; Y_A - Q = 0; h R_B - dQ = 0,$$

где $h = AB$, d — плечо силы \vec{Q} относительно точки A , а X_A и Y_A обозначают проекции силы \vec{R}_A . Из этих трёх уравнений определяются все три неизвестные силы

$$X_A = R_B = \frac{dQ}{h}, Y_A = Q.$$

Величина реакции

$$R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}.$$

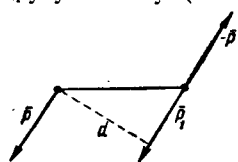
Если все силы, приложенные к телу (включая и силы реакции связей), параллельны, то проекция каждой силы на ось x , перпендикулярную к этим силам, будет равна нулю, а потому в этом случае вместо трёх условий равновесия имеем следующие два:

$$\sum Y_i = 0, \sum x_i Y_i = 0.$$

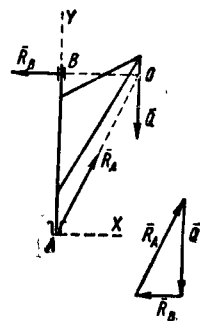
В качестве второго примера рассмотрим следующую задачу.

Данная плоская система сил, которая приводится к одной равнодействующей \vec{R} , должна уравниваться тремя силами, линии действия которых 1, 2, 3 заданы. Определить величины этих сил (фиг. 11).

Для решения этой задачи выбирают центр моментов в точке пересечения двух заданных линий, например в точке пересечения линий 2 и 3; величину силы \vec{P}_1 , направленной по линии 1, находят из уравнения моментов относительно этой точки: $R a_1 = P_1 b_1$; следовательно, $P_1 = \frac{a_1}{b_1} R$.



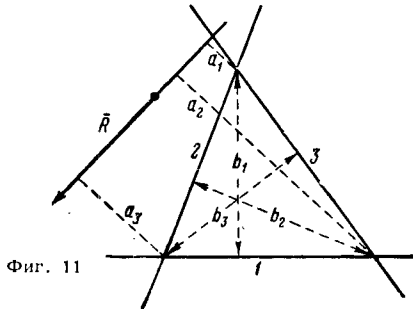
Фиг. 9



Фиг. 10

Аналогично из уравнений моментов относительно точек пересечения прямой 1 с прямыми 2 и 3 находят силы P_2 и P_3 :

$$P_2 = \frac{a_2}{b_2} R \text{ и } P_3 = \frac{a_3}{b_3} R^*.$$



Фиг. 11

Решение возможно лишь в том случае, когда три заданные прямые 1, 2 и 3 не пересекаются в одной точке.

СИСТЕМА СИЛ В ПРОСТРАНСТВЕ

Приведение системы сил к данному центру.

Для сложения сил \vec{P}_i , действующих на твёрдое тело и расположенных как угодно в пространстве, поступают подобно тому, как и при сложении сил, лежащих в одной плоскости. В общем случае система сил в пространстве приводится к одной силе \vec{R} , приложенной в произвольно выбранной точке O , называемой центром приведения, и к одной паре с моментом \vec{M}_0 .

Эта сила \vec{R} называется главным вектором данной системы сил, а вектор-момент \vec{M}_0 называется её главным моментом относительно выбранного центра приведения O .

При этом:

$$\vec{R} = \sum \vec{P}_i \text{ и } \vec{M}_0 = \sum \text{mom}_O(\vec{P}_i).$$

Отсюда:

$$R_x = \sum X_i; R_y = \sum Y_i; R_z = \sum Z_i;$$

$$M_{0x} = \sum \text{mom}_x(\vec{P}_i) = \sum (y_i Z_i - z_i Y_i);$$

$$M_{0y} = \sum \text{mom}_y(\vec{P}_i) = \sum (z_i X_i - x_i Z_i);$$

$$M_{0z} = \sum \text{mom}_z(\vec{P}_i) = \sum (x_i Y_i - y_i X_i).$$

Одну из сил пары, которая получается в результате приведения данной системы сил к какому-нибудь центру, всегда можно выбрать так, чтобы эта сила была приложена в центре приведения. Тогда, сложив эту силу с главным вектором, получают две скрещивающиеся силы. Следовательно, систему сил в пространстве можно всегда привести к двум скрещивающимся силам.

Условия равновесия. Для равновесия системы сил в пространстве необходимо и достаточно (так же как и для равновесия плоской системы сил), чтобы главный век-

тор этой системы и её главный момент относительно произвольно выбранной точки равнялись нулю или (в аналитической форме) чтобы сумма проекций всех сил данной системы на каждую из трёх координатных осей равнялась нулю и чтобы сумма их моментов относительно каждой из этих осей также равнялась нулю.

Следовательно, для системы сил в пространстве имеем шесть условий равновесия:

$$\sum X_i = 0; \sum Y_i = 0; \sum Z_i = 0;$$

$$\sum (y_i Z_i - z_i Y_i) = 0; \sum (z_i X_i - x_i Z_i) = 0;$$

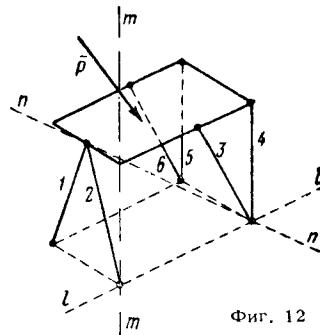
$$\sum (x_i Y_i - y_i X_i) = 0.$$

Задачи статики, относящиеся к равновесию твёрдого тела, находящегося под действием пространственной системы сил, решаются при помощи этих шести уравнений.

При помощи тех же шести уравнений может быть решена и задача о разложении какой-либо силы \vec{P} на составляющие, которые должны быть направлены по заданным прямым линиям, ибо при изменении направления этих составляющих на противоположное получим систему сил, для которой заданная сила \vec{P} является уравновешивающей. Следовательно, все эти силы должны удовлетворять указанным выше шести условиям равновесия. Так как линии действия искомым составляющих заданы, то, имея шесть уравнений, можно определить из них величину шести составляющих сил; следовательно, разложение данной силы по шести заданным в пространстве прямым линиям есть задача статически определённая.

Задача становится невозможной, если заданные шесть прямых расположены так, что можно провести прямую линию, пересекающую все эти шесть прямых и не пересекающую линии действия данной силы \vec{P} .

Для решения этой задачи можно выбрать две оси, пересекающие четыре из шести за-



Фиг. 12

данных прямых, и составить уравнения моментов относительно этих осей. В полученные два уравнения из шести неизвестных сил войдут только две, которые из этих уравнений и определяются.

Пример (фиг. 12). Горизонтальная плита укреплена при помощи шести стержней и испытывает действие сосредоточенной силы P . Линия mm пересекает стержни 1, 2, 3, 4 и 5 на конечном или бесконечно большом расстоянии; поэтому моменты сил реакции этих стержней относительно оси mm равны нулю, и из уравнения моментов относительно этой оси можно найти реакцию стержня 6. Затем из урав-

* В том случае, когда две из данных прямых, например 2 и 3, параллельны, для определения P нужно составить уравнение проекций на ось, перпендикулярную к этим прямым.

нения моментов относительно оси l определяется реакция стержня B . Далее из уравнения моментов относительно оси l находится реакция стержня 1 и т. д.

Рассмотренная задача имеет важное значение для случаев укрепления какого-нибудь тела на тонких стержнях, которые могут подвергаться только растягивающим или сжимающим, но не изгибающим усилиям.

Чтобы задача была статически определённой, таких стержней не должно быть более шести.

ПРИНЦИП ВИРТУАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Виртуальным (возможным) перемещением механической системы называется всякое бесконечно-малое перемещение этой системы, допускаемое в данный момент наложенными на систему связями. Если виртуальное перемещение какой-нибудь точки системы обозначим через δS , то проекции этого вектора на координатные оси будут равны δx , δy , δz , т. е. равны изменениям (вариациям) координат этой точки.

Виртуальной работой силы \bar{P} называется работа этой силы при виртуальном перемещении её точки приложения. Если обозначим виртуальную работу через δA , то

$$\delta A = P \cos(\bar{P}, \delta \bar{S}) \delta S,$$

или (в аналитической форме)

$$\delta A = X \delta x + Y \delta y + Z \delta z.$$

Если данное твёрдое тело может вращаться вокруг неподвижной оси z , то виртуальным перемещением для такого тела является поворот на любой элементарный угол $\delta \varphi$ вокруг оси z . Виртуальная работа силы \bar{P} , приложенной к этому телу, выражается так:

$$\delta A = m \omega_z(P) \delta \varphi.$$

В общем случае виртуальное перемещение твёрдого тела можно разложить на два перемещения: 1) поступательное перемещение δS_0 , равное перемещению какой-нибудь точки O тела, и 2) поворот на элементарный угол $\delta \varphi$ вокруг некоторой оси, проходящей через эту точку O . Сумма виртуальных работ сил \bar{P}_i , приложенных к этому телу, будет равна:

$$\sum \delta A_i = R \cos \psi \delta S_0 + M_0 \cos \theta \delta \varphi,$$

где \bar{R} — главный вектор данных сил \bar{P}_i ; ψ — угол между \bar{R} и δS_0 ; M_0 — главный момент сил \bar{P}_i относительно точки O и θ — угол между вектором \bar{M}_0 и осью вращения тела.

Если связи, наложенные на систему, таковы, что сумма работ сил реакции этих связей при всяком виртуальном перемещении системы равна нулю, то такие связи называются идеальными.

Равновесие системы. Принцип виртуальных (возможных) перемещений состоит в следующем: для того чтобы механическая система оставалась в равновесии в данном положении, необходимо и достаточно, чтобы сумма работ всех действующих на неё сил

при всяком виртуальном перемещении системы равнялась нулю, т. е. чтобы при всяком виртуальном перемещении системы имело место равенство:

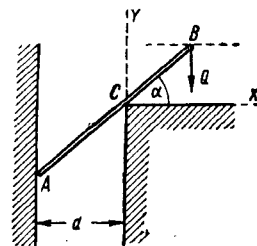
$$\sum (X_i \delta x_i + Y_i \delta y_i + Z_i \delta z_i) = 0.$$

Это уравнение выражает в самом общем виде необходимое и достаточное условие равновесия любой механической системы. В случае идеальных связей в это уравнение силы реакции связей не входят, так как работа этих сил при всяком виртуальном перемещении системы равна нулю.

Принципом виртуальных перемещений можно пользоваться для решения всякой задачи статики. Согласно этому принципу условие равновесия твёрдого тела выразится уравнением

$$R \cos \psi \delta S_0 + M_0 \cos \theta \delta \varphi = 0.$$

Если тело свободно, т. е. не связано никакими связями, то поступательное и вращательное перемещения для такого тела являются вполне произвольными. Поэтому, чтобы предыдущее уравнение имело место



Фиг. 13

для всякого виртуального перемещения тела, должны быть, очевидно, выполнены условия:

$$R = 0 \text{ и } M_0 = 0,$$

т. е. известные (см. выше) условия, которым должны удовлетворять силы, приложенные к твёрдому телу при равновесии.

Принципом виртуальных перемещений часто пользуются для определения положения равновесия системы.

Пример (фиг. 13). При каком положении стержень $AB = l$, несущий в точке B груз Q , будет находиться в равновесии, если пренебречь собственным весом стержня и трением в точках A и C ?

Будем определять положение стержня углом наклона α . Если начало координат возьмём в точке C , то ордината точки B

$$y_B = l \sin \alpha - d \operatorname{tg} \alpha.$$

Проекция силы Q на координатные оси равны:

$$X = 0 \text{ и } Y = -Q.$$

Следовательно, виртуальная работа этой силы равна

$$X \delta x_B + Y \delta y_B = -Q \delta y_B = -Q \left(l \cos \alpha - \frac{d}{\cos^2 \alpha} \right) \delta \alpha.$$

Так как при равновесии эта работа должна быть равна нулю, то

$$l \cos \alpha - \frac{d}{\cos^2 \alpha} = 0,$$

откуда

$$\cos \alpha = \sqrt[3]{\frac{d}{l}}.$$

Геометрически положение равновесия стержня определяется из того условия, что касательная в точке B к траектории, которую описывает эта точка при перемещении стержня, должна быть горизонтальной.

Равновесие называется устойчивым, если при достаточно малом отклоне

нении механической системы от положения равновесия и достаточно малых начальных скоростях материальных точек этой системы во всё время последующего движения система будет оставаться сколь угодно близкой к положению равновесия (т. е. отклонения всех точек системы от положения равновесия будут оставаться сколь угодно малы).

Пример. Неоднородный шар с эксцентрично расположенным центром тяжести находится на горизонтальной плоскости в устойчивом равновесии, если центр тяжести лежит ниже геометрического центра шара на одной вертикали с ним.

Равновесие называется неустойчивым, если система, будучи выведена из положения равновесия, при последующем движении не будет оставаться сколь угодно близкой к этому положению, как бы малы ни были начальные скорости точек системы и их начальные отклонения от положения равновесия.

Пример. Неоднородный шар с эксцентрично расположенным центром тяжести находится на горизонтальной плоскости в неустойчивом равновесии, если центр тяжести лежит выше геометрического центра шара на одной с ним вертикали.

Равновесие называется безразличным, если система, будучи выведена из положения равновесия, остаётся и в новом положении в состоянии равновесия.

Пример. Однородный шар, центр тяжести и геометрический центр которого совпадают, находится на горизонтальной плоскости в безразличном равновесии.

Если система находится в потенциальном силовом поле, то проекции на координатные оси сил, действующих на систему, равны в этом случае частным производным от потенциальной энергии Π по соответствующим координатам, взятым с обратным знаком, т. е.

$$X_i = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_i}; Y_i = -\frac{\partial \Pi}{\partial y_i}; Z_i = -\frac{\partial \Pi}{\partial z_i}.$$

Сумма виртуальных работ в этом случае выражается так:

$$\sum X_i \delta x_i + Y_i \delta y_i + Z_i \delta z_i = -\sum \left(\frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \delta x_i + \frac{\partial \Pi}{\partial y_i} \delta y_i + \frac{\partial \Pi}{\partial z_i} \delta z_i \right) = -\delta \Pi.$$

Следовательно, согласно принципу виртуальных перемещений необходимым и достаточным условием равновесия системы, находящейся в потенциальном силовом поле, является равенство $\delta \Pi = 0$.

Чтобы судить о том, является ли равновесие системы устойчивым или неустойчивым, можно пользоваться следующим признаком (признак Дирихле): если в положении равновесия системы потенциальная энергия имеет минимум, то равновесие является устойчивым.

В том случае, когда система находится в поле силы тяжести, т. е. когда на неё действуют только силы тяжести, потенциальная энергия выражается так:

$$\Pi = Mgh_c,$$

где M — масса всей системы, а h_c — высота центра тяжести системы, отсчитываемая от некоторой горизонтальной плоскости (на-

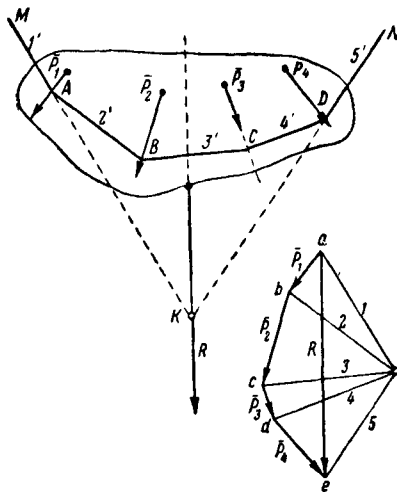
пример, от поверхности земли). Следовательно, в этом случае равновесие будет устойчивым при том положении системы, когда высота её центра тяжести имеет наименьшее из всех возможных значений. В том положении, когда высота центра тяжести системы имеет наибольшее значение, система находится в неустойчивом равновесии. Если $h_c = \text{const}$, т. е. если центр тяжести системы может перемещаться только в горизонтальной плоскости, то равновесие является безразличным.

ГРАФОСТАТИКА

Определение. Графическая статика, или графостатика, занимается графическим решением задач статики. Многие задачи, не относящиеся непосредственно к статике, например определение моментов инерции, могут быть также весьма просто решены методами графостатики.

Если дана система сил, как угодно расположенных на плоскости, то для нахождения их равнодействующей графостатика даёт простой метод, который основан на построении силового и верёвочного многоугольников.

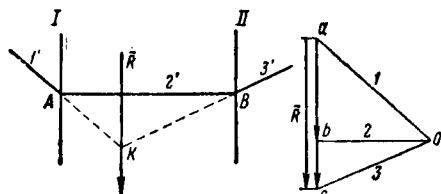
Верёвочный многоугольник. Пусть дана система сил P_1, P_2, P_3, P_4 (фиг. 14), расположенных как угодно на плоскости; тре-



Фиг. 14

буется найти равнодействующую этой системы. Для этого строим в выбранном масштабе силовой многоугольник $abcde$, стороны которого равны по величине и направлению заданным силам. Замыкающая сторона ae этого многоугольника равна по величине и направлению равнодействующей данной системы сил. Для нахождения линии действия этой равнодействующей делаем следующее построение: берут произвольную точку O , которая называется полюсом, и соединяют её лучами 1, 2, 3, 4, 5 с началом и концом каждой силы, имеющейся в многоугольнике $abcde$. Затем из произвольной точки M проводят прямую $1'$ параллельно лучу Oa до

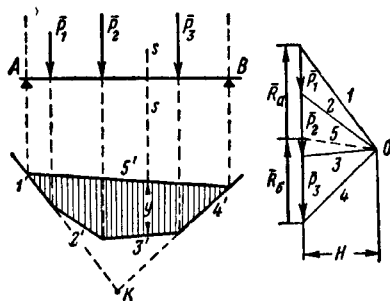
пересечения в точке A с линией действия силы \bar{P}_1 ; затем из точки A проводят вторую прямую $2'$ параллельно лучу Ob до встречи в точке B с линией действия силы \bar{P}_2 . Точно так же проводятся, далее, линии $3', 4', 5'$. Многоугольная линия $MABCDN$ называется верёвочным многоугольником, или многоугольником Вариньона. Продолжая крайние стороны $1'$ и $5'$ верёвочного многоугольника до их пересечения, находят точку K , через которую проходит линия действия равнодействующей данной



Фиг. 15

системы сил; перенося в эту точку вектор \bar{a}_e , определяющий величину и направление искомой равнодействующей, получают полное решение задачи.

Применяя построение силового и верёвочного многоугольников, легко решить графически и обратную задачу о разложении данной силы на две составляющие. Пусть требуется данную силу \bar{R} разложить на две составляющие силы, направленные по заданным прямым I и II , параллельным силе \bar{R} (фиг. 15). Для этого строят вектор \bar{ac} , равный и параллельный силе \bar{R} , и соединяют точки a и c лучами 1 и 3 с произвольно выбранным полюсом O . Затем проводят из произвольной точки прямую $1'$, параллельную лучу 1 , которая пересечёт прямую I и линию действия силы \bar{R} в точках A и K ; из точки K проводят прямую $3'$, параллельную



Фиг. 16

лучу 3 , которая пересечёт прямую II в точке B . Если соединить точки A и B прямой $2'$ и провести из полюса O прямую, параллельную AB , то получим на силовом многоугольнике луч 2 . Если обозначить точку пересечения этого луча с вектором \bar{ac} через b , то векторы \bar{ab} и \bar{bc} представляют собой искомые составляющие силы.

Этим способом можно графически найти опорные реакции в случае балки, лежащей

на двух опорах A и B (фиг. 16). Для этого нужно найти равнодействующую \bar{R} заданных параллельных сил \bar{P}_1 , \bar{P}_2 и \bar{P}_3 , приложенных к балке, и затем разложить эту равнодействующую на две параллельные ей силы, проходящие через опоры.

Эти составляющие силы определяют давления балки на опоры. Силы, равные им по величине и противоположные по направлению, представляют собой искомые реакции опор R_a и R_b .

Если данная плоская система сил такова, что многоугольник этих сил окажется замкнутым, то крайний (т. е. первый и последний) лучи на силовом многоугольнике совпадут, а соответствующие им стороны верёвочного многоугольника будут параллельны; точка K пересечения этих сторон окажется бесконечно удалённой, и, следовательно, верёвочный многоугольник не будет замыкаться.

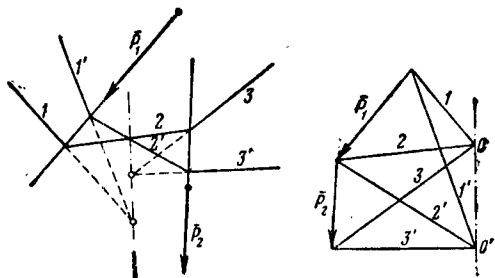
В этом случае данная система сил не имеет равнодействующей и приводится к паре сил. Чтобы данная система сил находилась в равновесии, необходимо (и достаточно), чтобы совпадали не только крайние лучи на силовом многоугольнике, но и соответствующие им крайние стороны верёвочного многоугольника, т. е. для равновесия плоской системы сил необходимо и достаточно, чтобы и силовой, и верёвочный многоугольники были замкнутыми.

При помощи замкнутого верёвочного многоугольника легко найти так называемый изгибающий момент для какого-нибудь сечения балки. Рассмотрим балку, лежащую на двух опорах и нагружённую параллельными силами \bar{P}_1 , \bar{P}_2 и \bar{P}_3 (фиг. 16), которые уравниваются двумя вертикальными реакциями опор. Силовой и верёвочный многоугольники, построенные для этой уравнивающейся системы пяти сил, являются замкнутыми (фиг. 16). Изгибающим моментом M_s для какого-нибудь поперечного сечения ss балки называется алгебраическая сумма моментов всех сил (включая и опорную реакцию), расположенных по одну сторону от этого сечения (например, справа) относительно точки пересечения плоскости этого сечения с осью балки. Если обозначим через H полюсное расстояние, т. е. расстояние полюса O от прямой, на которой расположены силы в силовом многоугольнике, то можно доказать, что $M_s = Hy$, где y — длина заключающегося внутри замкнутого верёвочного многоугольника отрезка прямой, параллельной приложенным к балке силам и проходящей через точку пересечения плоскости рассматриваемого сечения с осью балки. Полюсное расстояние H измеряется в том же масштабе, в котором построены данные силы P_i в силовом многоугольнике, а величина y измеряется в масштабе длин (в том масштабе, в котором изображена на чертеже длина балки). Отсюда легко находится «опасное сечение» балки, т. е. то сечение, для которого изгибающий момент имеет наибольшую величину и для которого, следовательно, $y = y_{\max}$. На фиг. 16 наибольшим является, очевидно,

изгибающий момент для сечения, проходящего через точку приложения силы P_2 .

Примечание. О других применениях верёвочного многоугольника см. ТСЖ, т. II, «Сопроотивление материалов».

Если для данной системы сил (например, для сил P_1 и P_2) построить силовой многоугольник и затем два верёвочных многоугольника, соответствующих двум каким-нибудь полюсам O и O' , то точки пересечения соответствующих сторон обоих верёвочных многоугольников все лежат на одной прямой, параллельной линии, соединяющей оба полюса O и O' (фиг. 17). Этой теоремой пользуются иногда для более простого построения второго верёвочного многоугольника,



Фиг. 17

когда первый многоугольник построен; при этом способе построения нет надобности проводить лучи из второго полюса.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В СТЕРЖНЯХ ФЕРМЫ

Определение. Фермой называется конструкция, состоящая из прямых стержней, соединённых между собой по концам шарнирными узлами и образующих геометрически неизменяемую систему. Если оси всех стержней фермы и все действующие на неё силы лежат в одной плоскости, то ферма называется плоской. Если трения в шарнирах нет и все заданные силы приложены только в узлах фермы, то это обеспечивает наличие в стержнях плоской фермы только сжимающих или растягивающих усилий. Если все опорные реакции и усилия в стержнях фермы могут быть определены при помощи уравнений статики абсолютно твёрдого тела, то такая ферма называется статически определимой. В противном случае ферма называется статически неопределимой.

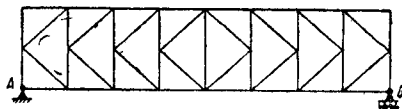
Если с фермы нельзя снять ни одного стержня без нарушения условия геометрической неизменяемости, то такая ферма называется фермой без лишних стержней. В противном случае ферма носит название фермы с лишними стержнями. Между числом m стержней и числом n узлов фермы без лишних стержней существует зависимость: $m = 2n - 3$. Если число неизвестных реакций опор плоской фермы без лишних стержней не более трёх, то ферма является статически определимой. Ферма с лишними стержнями является статически неопределимой.

При расчёте фермы прежде всего нужно определить сжимающие или растягивающие усилия, возникающие в стержнях фермы при действии на ферму заданных сил (нагрузок), приложенных в её узлах. Но прежде чем определять эти усилия, нужно найти реакции опор. Для этого нужно знать конструктивное оформление опоры. В плоских фермах различают следующие виды опор:

а) Подвижной опорный шарнир (опора на катках — см. на фиг. 18 опора B — или качающаяся опорная колонка).

Опорная реакция проходит через ось шарнира и перпендикулярна к направлению его возможного перемещения; так как в этом случае направление реакции известно, то при определении реакции такой опоры нужно найти только одну неизвестную величину — величину этой реакции.

б) Неподвижный опорный шарнир (фиг. 18, опора A). Опорная реакция проходит через ось шарнира; в этом случае неизвестны ни величина, ни направление реакции. При определении реакции такой опоры имеем две неизвестные величины: горизонтальную и вертикальную составляющие искомой реакции.



Фиг. 18

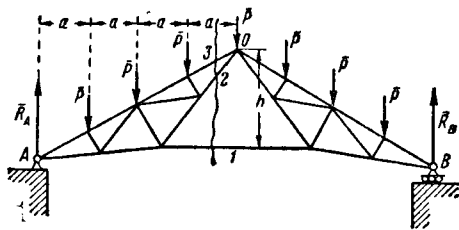
в) Неподвижное закрепление (например, заделанный в стену конец балки); в этом случае силы реакции приводятся к одной силе и к одной паре, а потому имеем три неизвестные величины: горизонтальную и вертикальную составляющие этой силы и момент пары.

Если число неизвестных опорных реакций не более трёх, то в случае плоской фермы эти реакции можно определить или аналитически — при помощи трёх уравнений равновесия, которым должны удовлетворять все внешние силы, приложенные к ферме (заданные силы и опорные реакции), или графически — построением замкнутых силового и верёвочного многоугольников. После того как опорные реакции найдены, переходят к определению усилий в стержнях фермы. Для решения этой задачи применяют обычно аналитический или графический способ.

Аналитический способ определения усилий в стержнях фермы (способ Риттера). Ферма условно разрезается на две части и одна часть фермы мысленно отбрасывается. Действие отброшенной части фермы на оставшуюся заменяется силами, направленными вдоль перерезанных стержней. Первый разрез следует делать так, чтобы при этом перерезались не более чем три стержня, не имеющие общей точки пересечения. Далее, для нахождения усилий в трёх перерезанных стержнях составляют три уравнения, приравняв нулю суммы моментов всех сил, приложенных к оставшейся части фермы относительно трёх точек Риттера (точкой Риттера называется точка пересечения осей двух перерезанных стержней); в каждое из этих урав-

нений войдёт только одна неизвестная сила, которая из этого уравнения и определяется.

При составлении уравнений моментов каждую из сил, заменяющих действие разрезанного стержня, следует направлять вдоль этого стержня от узла фермы, что соответствует случаю растяжения стержня. Если в результате решения этих уравнений числовая величина усилия окажется положительной, то стержень растянут; если же эта величина окажется отрицательной, то истинным направлением искомого усилия будет направление, противоположное принятому, т. е. стержень будет сжат.



Фиг. 19

Если из трёх разрезанных стержней два параллельны, то точка пересечения осей этих стержней является бесконечно удалённой. В этом случае вместо трёх уравнений моментов составляют два уравнения моментов (относительно двух точек Риттера) и уравнение проекций всех сил на ось, перпендикулярную к этим параллельным стержням.

Пример (фиг. 19). Для определения усилий S_1 , S_2 и S_3 в стержнях 1, 2, 3, не пересекающихся в одной точке, перерезаем эти стержни и удаляем правую часть фермы. Принимая во внимание, что опорные реакции равны $R_A = \frac{7}{2}P$ и $R_B = \frac{7}{2}P$ и составляя уравнение моментов относительно точки пересечения O стержней 2 и 3 (для левой части фермы), находим

$$4a \frac{7}{2}P - 3aP - 2aP - aP - S_1 h = 0,$$

откуда

$$S_1 = 8 \frac{a}{h} P.$$

Аналогично определяются усилия S_2 и S_3 .

Делая последовательно ряд других разрезов, можно найти этим способом усилия во всех стержнях данной фермы.

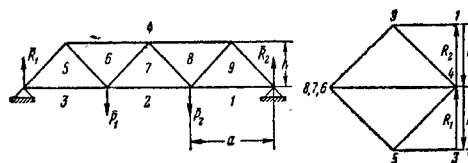
Графический способ определения усилий в стержнях фермы (способ Кремоны). Вырезают какой-нибудь узел фермы, т. е. перерезают сходящиеся в нём стержни, и заменяют их силами, направленными вдоль этих стержней; затем рассматривают получившийся после этого пучок сил, приложенных к этому узлу и находящихся в равновесии. Так как для равновесия пучка сил необходимо и достаточно, чтобы многоугольник этих сил замыкался, то, построив замкнутый многоугольник всех сил, приложенных к вырезанному узлу, можно найти величину искомого усилия в перерезанных стержнях.

При этом при вырезании каждого узла нужно следить за тем, чтобы в нём сходи-

лось не более двух стержней, усилия в которых ещё не найдены, так как в противном случае построение замкнутого силового многоугольника не даёт возможности найти неизвестные силы, приложенные к рассматриваемому узлу.

Для определения по этому способу усилий во всех стержнях фермы нужно построить диаграмму Кремоны, для чего поступают следующим образом. Ферма схематически чертится в выбранном масштабе (фиг. 20). Затем одним из способов, графическим или аналитическим, определяются опорные реакции R_1 и R_2 .

Далее обозначают цифрами 1, 2, 3, 4 внешние области, т. е. части плоскости, ограниченные внешним контуром фермы и линиями заданных внешних сил и опорных реакций, и цифрами 5, 6, 7, 8, 9 — внутренние области, т. е. части плоскости, расположенные внутри фермы и ограниченные только стержнями фермы. Затем строят замкнутый многоугольник внешних сил, причём строят эти внешние силы в том порядке, в котором мы их встречаем при обходе фермы по часовой стрелке (т. е. в порядке: P_2, P_1, R_1, R_2). В начале и в конце каждой силы ставят те же цифры, какими обозначены две смежные области, для которых линия данной силы является общей границей. После этого построение диаграммы Кремоны начинают с того узла, в котором сходится не более двух стержней, т. е. в данном случае с левого опорного узла. Через точку 4 на многоугольнике сил проводят прямую, параллельную стержню 4—5, т. е. стержню, разграничивающему две смежные области 4 и 5, а через точку 3 — прямую, параллельную стержню 5—3; в пересечении этих прямых получают точку 5. Обходя построенный таким образом силовой треугольник 3—4—5 в направлении



Фиг. 20

силы R_1 , можно заметить, что усилие в стержне 4—5 направлено к узлу, следовательно этот стержень сжат; усилие в стержне 5—3 направлено от узла, следовательно, этот стержень растянут. Далее, переходя к верхнему левому узлу и построив для него таким же способом силовой треугольник 4—5—6, определяют усилия в стержнях 5—6 и 4—6. Подобным же образом определяют усилия и в остальных стержнях фермы.

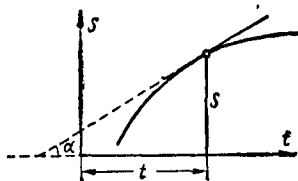
Если на диаграмме Кремоны некоторые стороны силовых многоугольников обращаются в точки, то усилия в соответствующих стержнях фермы равны нулю. Так, в рассматриваемом примере совпадают три точки — 6, 7, 8; следовательно, усилия в стержнях 6—7 и 7—8 равны нулю (подробнее см. «Статика сооружений»).

КИНЕМАТИКА

ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ

Закон движения. Скорость. Ускорение. Положение точки, движущейся прямолинейно, в каждый данный момент вполне определяется расстоянием s этой точки от некоторой неподвижной точки O , произвольно выбираемой на прямолинейной траектории движущейся точки. Это переменное расстояние s , рассматриваемое как алгебраическая величина (как абсцисса точки), является некоторой однозначной и непрерывной функцией времени, т. е. $s = f(t)$.

Это уравнение называется уравнением или законом движения точки. Если изобразим зависимость между s и t графически, то получим некоторую кривую, которая называется графиком



Фиг. 21

движения или кривой расстояний (фиг. 21). Величина скорости точки определяется по формуле

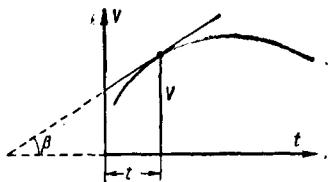
$$v = \frac{ds}{dt} = f'(t).$$

Отсюда следует, что величина скорости численно равна тангенсу угла наклона касательной к графику движения (фиг. 21), т. е. $v = \operatorname{tg} \alpha$. Направление скорости совпадает с направлением прямолинейной траектории точки. Ускорение точки в прямолинейном движении равно производной от скорости по времени, т. е.

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = f''(t).$$

Если изобразить зависимость между v и t графически, то получим некоторую кривую, которая называется графиком скорости или кривой скоростей (фиг. 22).

Величина ускорения численно равна тангенсу угла наклона касательной к графику скорости, т. е. $a = \operatorname{tg} \beta$ (фиг. 22).

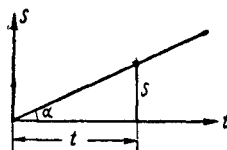


Фиг. 22

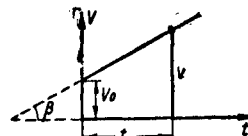
Равномерное и равномерно-переменное движение точки. При равномерном движении точки, т. е. при движении с постоянной скоростью, график движения

изображается прямой линией с углом наклона α (фиг. 23), причём $v = \operatorname{tg} \alpha = \frac{s}{t}$ и $s = vt$.

В этом случае ускорение точки равняется нулю. Движение точки называется равномерно-ускоренным или равномерно-замедленным, если ускорение a является величиной постоянной, а именно:



Фиг. 23



Фиг. 24

движение называется равномерно-ускоренным, если ускорение положительно, и равномерно замедленным, если оно отрицательно. Для случая равномерно-переменного движения график скорости является прямой линией с углом наклона β (фиг. 24).

Из фиг. 24 имеют:

$$a = \operatorname{tg} \beta = \frac{v - v_0}{t}.$$

Отсюда

$$v = v_0 + at,$$

где v_0 — начальная скорость, соответствующая моменту $t = 0$.

Так как

$$\frac{ds}{dt} = v,$$

то

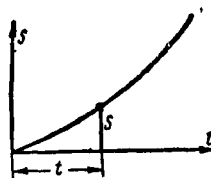
$$ds = v dt = (v_0 + at) dt$$

и

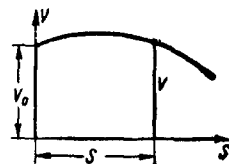
$$s = \int_0^t v dt = v_0 t + \frac{1}{2} at^2,$$

или

$$s = (2v_0 + at) \frac{t}{2} = \frac{v_0 + v}{2} t,$$



Фиг. 25



Фиг. 26

или

$$s = \frac{v_0 + v}{2} \cdot \frac{v - v_0}{a} = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}.$$

При $v_0 = 0$ получим

$$v = at \text{ и } s = \frac{a}{2} t^2,$$

или

$$s = \frac{v^2}{2a} \text{ и } v = \sqrt{2as}.$$

При равномерно-переменном движении график движения является параболой (фиг. 25).

Если в общем случае прямолинейного движения точки исключим из уравнений $s = f(t)$ и $v = f'(t)$ время t , то получим зависимость между v и s ; графически эта зависимость выразится некоторой кривой линейной, изображённой на фиг. 26.

Рассматривая скорость v как функцию переменного s , будем иметь

$$v = \varphi(s).$$

Основные задачи кинематики точки в случае прямолинейного движения. В зависимости от того, какие из четырёх величин — s , v , a , t даны и какие требуется найти, имеются следующие основные типы задач, относящихся к прямолинейному движению точки:

1. Дано $v = f(t)$; найти s и a .

Решение: $s = s_0 + \int_0^t v dt$; $a = \frac{dv}{dt}$.

2. Дано $v = f(s)$; найти a и t .

Решение:

$$t = \int_{s_0}^s \frac{ds}{v}; a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = v \frac{dv}{ds}.$$

3. Дано $a = f(t)$; найти s и v .

Решение: $v = v_0 + \int_0^t a dt$; $s = s_0 + \int_0^t v dt$.

4. Дано $a = f(s)$; найти v и t .

Решение: $v = \sqrt{v_0^2 + 2 \int_{s_0}^s a ds}$; $t = \int_{s_0}^s \frac{ds}{v}$.

5. Дано $a = f(v)$; найти s и t .

Решение: $s = s_0 + \int_{v_0}^v \frac{v}{a} dv$; $t = \int_{v_0}^v \frac{dv}{a}$.

КРИВОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ

Способы задания движения точки. Положение движущейся точки M в пространстве может быть определено её радиусом-вектором \vec{r} , который проводится из некоторой произвольно выбранной неподвижной точки O (из начала координат, фиг. 27).

Если радиус-вектор является заданной функцией времени, т. е. $\vec{r} = \vec{F}(t)$, то движение точки будет вполне определено, так как в каждый данный момент положение точки в пространстве будет известно. В этом состоит векторный способ задания движения точки в кинематике.

Второй, так называемый естественный, способ задания движения точки состоит в том, что задается (является известной) траектория точки и закон, или уравнение, движения точки по этой траектории, т. е. уравнение

$$s = f(t).$$

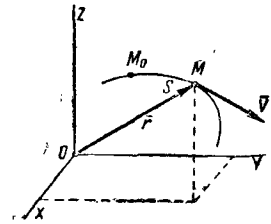
В этом уравнении s обозначает длину дуги траектории, причём началом этой дуги является некоторая произвольно выбранная на траектории неподвижная точка (например, начальное положение M_0 движущейся точки), а концом — положение движущейся точки в данный момент t (фиг. 27).

Третий (аналитический или координатный) способ задания движения точки состоит в том, что положение точки определяется её декартовыми координатами x, y, z . При движении точки эти координаты являются некоторыми однозначными и непрерывными функциями времени, т. е.

$$x = f_1(t), y = f_2(t), z = f_3(t).$$

Эти уравнения называются уравнениями движения точки в декартовых координатах.

Если точка движется в одной и той же плоскости, то эту плоскость можно принять за координатную плоскость xOy и для определения движения точки в этом случае достаточно двух первых уравнений.



Фиг. 27

Чтобы найти траекторию точки в том случае, когда её движение задано уравнениями в декартовых координатах, нужно из этих уравнений исключить время t .

Пример. Найти траекторию точки, если её движение задано уравнениями: $x = a \cos(kt)$, $y = b \sin(kt)$. Перепишем данные уравнения в виде: $\frac{x}{a} = \cos(kt)$ и $\frac{y}{b} = \sin(kt)$, возведём их в квадрат и сложим. Тогда

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1;$$

следовательно, траектория точки есть эллипс с полуосями a и b .

Скорость. Скорость криволинейного движения точки определяется как производная (векторная) от радиус-вектора этой точки по времени, т. е. $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$. Вектор скорости \vec{v} направлен по касательной к траектории (фиг. 27). Величина скорости, так же как и в случае прямолинейного движения, определяется по формуле

$$v = \frac{ds}{dt} = f'(t).$$

В том случае, когда движение точки задано аналитическим способом, скорость определяется по её проекциям на координатные оси, причём эти проекции равны производным от соответствующих координат движущейся точки по времени, т. е.

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} = f'_1(t); v_y = \frac{dy}{dt} = f'_2(t); v_z = \\ &= \frac{dz}{dt} = f'_3(t). \end{aligned}$$

Величина скорости

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}.$$

Для определения направления скорости нужно найти углы α , β , γ вектора \vec{v} с координатными осями; эти углы определяются по формулам:

$$\cos \alpha = \frac{v_x}{v}; \cos \beta = \frac{v_y}{v}; \cos \gamma = \frac{v_z}{v}.$$

Ускорение. Ускорением точки в криволинейном движении называется производная (векторная) от вектора скорости по времени, т. е. $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$. Проекции ускорения на координатные оси равны вторым производным от соответствующих координат движущейся точки по времени, т. е.

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = \dot{f}_1'(t); a_y = \frac{d^2y}{dt^2} = \dot{f}_2'(t);$$

$$a_z = \frac{d^2z}{dt^2} = \dot{f}_3'(t).$$

Величина ускорения

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = \sqrt{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)^2}.$$

Углы α_1 , β_1 , γ_1 вектора \vec{a} с координатными осями, определяющие его направление, находятся по формулам:

$$\cos \alpha_1 = \frac{a_x}{a}; \cos \beta_1 = \frac{a_y}{a}; \cos \gamma_1 = \frac{a_z}{a}.$$

Для определения ускорения точки в том случае, когда её движение задано естественным способом, нужно вектор \vec{a} разложить на два составляющих ускорения: касательное (тангенциальное) ускорение a_t и нормальное ускорение a_n . Величины этих составляющих ускорений равны

$$a_t = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}; a_n = \frac{v^2}{\rho},$$

где ρ — радиус кривизны траектории в той её точке, с которой совпадает в данный момент движущаяся точка. Касательное ускорение a_t направлено по касательной к траектории в ту же сторону, что и скорость v , при ускоренном движении, и в сторону, противоположную скорости, при замедленном движении. Нормальное ускорение a_n направлено всегда по нормали* к центру кривизны траектории.

Величина ускорения \vec{a} определяется в этом случае по формуле

* В том случае, когда траектория точки не лежит в одной плоскости, нормальное ускорение a_n направлено по главной нормали траектории.

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} = \sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{\rho}\right)^2}.$$

Так как для прямой линии радиус кривизны $\rho = \infty$, то в случае прямолинейного движения точки $a_n = 0$, и, следовательно, в этом случае

$$a = a_t = \frac{dv}{dt}.$$

Для окружности радиус кривизны ρ равен радиусу R этой окружности; следовательно, в случае движения точки по окружности $a_n = \frac{v^2}{R}$; в этом случае нормальное ускорение a_n называется также центростремительным.

В общем случае, когда траектория точки есть некоторая плоская кривая, заданная уравнением $y = \varphi(x)$, радиус кривизны

$$\rho = \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{y''},$$

где

$$y' = \frac{dy}{dx} \text{ и } y'' = \frac{d^2y}{dx^2}.$$

Если точка движется равномерно, то $v = \text{const}$ и $a_t = 0$, а потому $a = a_n = \frac{v^2}{\rho}$.

Следовательно, в случае равномерного криволинейного движения ускорение точки a совпадает с нормальным ускорением a_n . Ускорение возникает в этом случае, очевидно, потому, что изменяется направление вектора скорости.

СЛОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ

Понятие о сложном движении точки. Если наблюдать движение точки относительно некоторой системы координат (системы отсчёта), которая сама движется относительно другой неподвижной системы отсчёта, то такое движение точки относительно подвижной системы отсчёта называется относительным.

Движение подвижной системы отсчёта относительно неподвижной называется переносным движением. То движение точки, которое получается в результате сложения относительного и переносного движений, т. е. её движение относительно неподвижной системы отсчёта, называется абсолютным.

Таким образом, движение точки относительно неподвижной системы отсчёта (абсолютное движение) является в этом случае сложным, поскольку его можно рассматривать как результат сложения двух движений (относительного и переносного). Например, если точка (тело) движется относительно движущегося вагона, то это движение будет относительным; движение вагона будет называться переносным, а движение точки (тела) относительно земли — абсолютным.

Подвижной системой отсчёта здесь является система координат, связанная с вагоном,

а неподвижной системой отсчёта — система координат, связанная с землёй.

Сложение скоростей и ускорений. В соответствии с этим приходится рассматривать скорость и ускорение точки в каждом из этих трёх движений, т. е. рассматривать абсолютную скорость \vec{v} и абсолютное ускорение \vec{a} точки, относительную скорость \vec{v}_r и относительное ускорение \vec{a}_r точки, а также переносную скорость точки \vec{v}_e и её переносное ускорение \vec{a}_e . При этом под переносной скоростью точки понимают ту скорость, которую имела бы в данный момент эта точка, если бы она была неизменно соединена с системой подвижных осей, т. е., другими словами, переносной скоростью называется скорость той точки, неизменно соединённой с системой подвижных осей, с которой совпадает в данный момент движущаяся точка. То же определение относится и к переносному ускорению точки.

Абсолютная скорость точки равна по величине и направлению диагонали параллелограмма, сторонами которого являются относительная и переносная скорости этой точки, или, что то же, абсолютная скорость равна геометрической сумме относительной и переносной скоростей, т. е.

$$\vec{v} = \vec{v}_r + \vec{v}_e$$

(теорема сложения, или теорема параллелограмма скоростей).

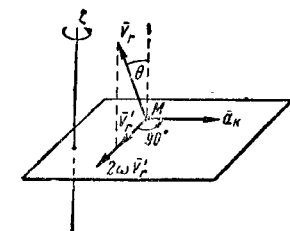
Та же теорема имеет место и для абсолютного ускорения точки, но только в том случае, когда переносное движение является поступательным. Следовательно, если переносное движение является поступательным, то

$$\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_e.$$

Если же переносное движение является вращательным (если подвижная система отсчёта вращается вокруг некоторой оси с угловой скоростью ω), то в этом случае абсолютное ускорение точки равно геометрической сумме трёх ускорений: относительного, переносного и добавочного, которое называется ускорением Кориолиса, т. е.

$$\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_e + \vec{a}_k$$

(теорема Кориолиса).



Фиг. 28

Для определения величины и направления добавочного ускорения \vec{a}_k можно пользоваться следующим правилом: 1) через движущуюся точку M проводят плоскость, перпендикулярную к оси ζ переносного вращения; 2) проектируют на эту плоскость вектор относительной скорости точки; 3) умножают эту проекцию на удвоенную угловую скорость переносного вращения и 4) полученный после этого вектор поворачивают на 90° в направлении переносного вращения (фиг. 28).

Таким образом, вектор добавочного ускорения \vec{a}_k лежит в плоскости, перпендикулярной к оси переносного вращения, и перпендикулярен к относительной скорости точки. Если обозначить через \vec{v}_r' проекцию относительной скорости \vec{v}_r на плоскость, перпендикулярную к оси переносного вращения, а угол вектора \vec{v}_r с этой осью обозначить через θ (фиг. 28), то $\vec{v}_r' = v_r \sin \theta$, а потому

$$a_k = 2\omega v_r \sin \theta.$$

Если вектор \vec{v}_r перпендикулярен к оси переносного вращения, то $\sin \theta = 1$, и, следовательно, в этом случае $a_k = 2\omega v_r$.

Если же вектор \vec{v}_r параллелен этой оси, то $\sin \theta = 0$, и, следовательно, в этом случае $a_k = 0$.

ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА

Поступательным движением твёрдого тела называется такое движение, при котором всякая прямая, произвольно взятая в этом теле, перемещается параллельно самой себе.

Примером такого движения может служить движение кузова вагона на прямолинейном участке пути.

При поступательном движении все точки тела описывают одинаковые траектории и в каждый данный момент имеют равные и параллельные скорости и ускорения.

Отсюда следует, что поступательное движение твёрдого тела вполне определяется движением одной какой-нибудь его точки, например движением центра тяжести тела. Таким образом, изучение поступательного движения твёрдого тела в кинематике сводится к задаче кинематики точки.

ВРАЩЕНИЕ ТВЁРДОГО ТЕЛА ВОКРУГ НЕПОДВИЖНОЙ ОСИ

Закон вращения. Угловая скорость и угловое ускорение. Положение твёрдого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, определяется углом поворота φ тела, выражаемым в радианах и отсчитываемым от некоторой неподвижной плоскости, проходящей через ось вращения тела. При вращении тела этот угол является некоторой однозначной и непрерывной функцией времени, т. е. $\varphi = f(t)$.

Это уравнение называется уравнением или законом вращательного движения тела вокруг данной неподвижной оси. Производная от угла φ по времени называется угловой скоростью тела; следовательно, угловая скорость $\omega = \frac{d\varphi}{dt} = f'(t)$. Производная от угловой скорости по времени называется угловым ускорением тела; следовательно, угловое ускорение $\epsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = f''(t)$. Если $\omega = \text{const}$, то вращение тела называется равномерным. Когда задано

число n оборотов тела в минуту, его угловая скорость определяется по формуле

$$\omega = \frac{\pi n}{30 \text{ сек}}.$$

Если $\epsilon = \text{const}$, то вращение тела называется равномерно-переменным (равномерно-ускоренным или равномерно-замедленным, в зависимости от того, будет ли $\epsilon > 0$ или $\epsilon < 0$). При равномерно-переменном вращении тела имеем следующие формулы для угловой скорости и угла поворота, аналогичные формулам для скорости и пройденного пути при равномерно-переменном прямолинейном движении точки:

$$\omega = \omega_0 + \epsilon t; \varphi = \omega_0 t + \frac{1}{2} \epsilon t^2,$$

или

$$\varphi = \frac{\omega_0 + \omega}{2} t,$$

где ω_0 — начальная угловая скорость тела. В кинематике твёрдого тела его угловая скорость часто изображается в виде вектора.

Вектор ω направляется по оси вращения тела в ту сторону, чтобы наблюдатель, смотрящий вдоль этого вектора в направлении от его конца к началу, видел вращение тела происходящим против часовой стрелки (правило правого винта). Модуль (длина) вектора ω равен (в выбранном масштабе) абсолютной величине угловой скорости тела; что касается начала вектора ω , то эта точка может быть выбрана на оси вращения тела произвольно; следовательно, вектор угловой скорости, подобно силе, есть вектор скользящий.

При вращении тела вокруг неподвижной оси каждая точка тела описывает окружность, центр которой лежит на оси вращения тела и плоскость которой перпендикулярна к этой оси. Если обозначить радиус этой окружности, равный расстоянию данной точки от оси вращения, через R , то величина скорости этой точки равна $v = R\omega$.

Касательное и нормальное ускорения точки определяются по формулам:

$$a_t = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} (R\omega) = R \frac{d\omega}{dt} = R\epsilon;$$

$$a_n = \frac{v^2}{R} = R\omega^2.$$

Следовательно, величина ускорения точки равна

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} = R \sqrt{\epsilon^2 + \omega^4}.$$

Если $\omega = \text{const}$, то $\epsilon = 0$, а потому $a_t = 0$ и $a = a_n = R\omega^2$. В этом случае ускорение a совпадает с нормальным (центростремительным) ускорением.

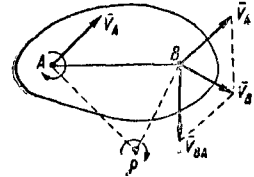
ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА

Плоско-параллельным движением твёрдого тела называется такое движение, при котором расстояние каж-

дой точки тела от данной неподвижной плоскости остаётся постоянным.

При таком движении все точки тела описывают плоские траектории, расположенные в плоскостях, параллельных данной неподвижной плоскости. Кроме того, все точки тела, лежащие на одной прямой, перпендикулярной к данной неподвижной плоскости, движутся по одинаковым траекториям с равными (по величине и направлению) в каждый данный момент скоростями и ускорениями. Отсюда следует, что изучение плоско-параллельного движения твёрдого тела сводится к изучению движения точек, принадлежащих сечению этого тела плоскостью, параллельной данной неподвижной плоскости, т. е. к изучению движения некоторой плоской фигуры, движущейся в своей плоскости.

Примером такого движения тела может служить качение вагонного колеса по рельсу; расстояние каждой точки колеса от неподвижной вертикальной плоскости, перпендикулярной к оси колеса, остаётся неизменным.



Фиг. 29

Пусть данная плоская фигура (плоское сечение данного тела) движется в плоскости чертежа (фиг. 29). Движение этой плоской фигуры в общем случае можно разложить на два движения: 1) поступательное со скоростью, равной скорости v_A произвольно выбранной точки A фигуры, и 2) вращательное с некоторой угловой скоростью ω вокруг этой точки A . Отсюда на основании теоремы сложения скоростей заключаем, что скорость любой точки B фигуры равна геометрической сумме скоростей этой точки в каждом из этих двух движений, т. е.

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{BA},$$

где \vec{v}_{BA} обозначает скорость точки B во вращательном движении вокруг точки A , причём

$$\vec{v}_{BA} \perp AB \text{ и } v_{BA} = AB\omega.$$

Мгновенный центр вращения плоской фигуры. Центроиды. Указанные два движения приводятся к одному вращательному движению той же угловой скоростью ω вокруг некоторой вполне определённой для данного момента точки P , скорость которой в данный момент равна нулю, и которая называется мгновенным центром вращения фигуры или мгновенным центром скоростей (фиг. 29).

Следовательно, в течение любого бесконечно-малого промежутка времени движение плоской фигуры является вращением вокруг мгновенного центра скоростей. А потому

$$v_A = PA\omega$$

и

$$v_B = PB\omega,$$

Если $\epsilon = 0$, то мгновенный центр ускорений P лежит на полупрямой, по которой направлен вектор \vec{a}_A и $AP = \frac{a_A}{\omega^2}$.

ВИНТОВОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА

Если твёрдое тело вращается вокруг неподвижной оси z с угловой скоростью ω и в то же время движется поступательно со скоростью \vec{u} , направленной вдоль этой оси, то такое движение тела называется винтовым; ось z называется винтовой осью (фиг. 31).

Скорость всякой точки тела при винтовом движении равна геометрической сумме скоростей этой точки в каждом из этих составляющих движений; то же относится и к ускорению точки. Следовательно,

$$\vec{v} = \vec{u} + \vec{v}_{ep} \quad \text{и} \quad \vec{a} = \frac{d\vec{u}}{dt} + \vec{a}_{ep}.$$

При этом

$$\vec{v}_{ep} \perp \vec{u}, \quad \vec{a}_{ep} \perp \vec{u} \quad \text{и} \quad v_{ep} = r\omega,$$

$$a_{ep} = r\sqrt{\epsilon^2 + \omega^4},$$

где $\epsilon = \frac{d\omega}{dt}$, а r — расстояние данной точки тела от винтовой оси. Отсюда следует, что

$$v = \sqrt{u^2 + r^2\omega^2}$$

и

$$a = \sqrt{\left(\frac{du}{dt}\right)^2 + r^2(\epsilon^2 + \omega^4)}.$$

Если $\frac{u}{\omega} = \text{const}$, то траекторией точки тела при его винтовом движении является винтовая линия, расположенная на поверхности круглого цилиндра радиуса r . Скорость v точки направлена по касательной к этой винтовой линии. Винтовая линия пересекает все образующие цилиндра под одним и тем же углом γ , причём $\text{tg } \gamma = \frac{r\omega}{u}$. При развёртке цилиндра на плоскости винтовая линия превращается в прямую. Расстояние h , на которое перемещается тело вдоль винтовой оси при одном полном обороте вокруг этой оси, называется шагом винтовой линии, причём

$$h = 2\pi r \text{ctg } \gamma = \frac{2\pi u}{\omega}.$$

ОБЩИЙ СЛУЧАЙ ДВИЖЕНИЯ СВОБОДНОГО ТВЁРДОГО ТЕЛА

В общем случае движение свободного твёрдого тела можно разложить на два движения: 1) поступательное со скоростью, равной скорости произвольно выбранной

точки тела, например его центра тяжести C , и 2) вращательное с некоторой угловой скоростью ω вокруг мгновенной оси, проходящей через эту точку C . Примером такого движения тела может служить движение артиллерийского снаряда.

В общем случае направление оси вращения тела не остаётся неизменным: каждому моменту t соответствует своё определённое направление этой оси. Скорость всякой точки тела равна геометрической сумме скоростей этой точки в каждом из двух составляющих движений, т. е.

$$\vec{v} = \vec{v}_C + \vec{v}_{ep},$$

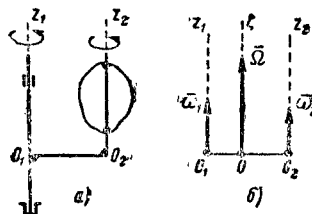
причём

$$v_{ep} = h\omega,$$

где h — расстояние данной точки тела от мгновенной оси вращения, проходящей через точку C .

СЛОЖЕНИЕ ДВИЖЕНИЙ ТВЁРДОГО ТЕЛА

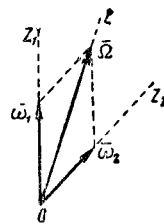
Если тело участвует в двух движениях (относительном и переносном), причём оба эти движения являются поступательными, то результирующее (абсолютное) движение



Фиг. 32

тела будет также поступательным, скорость которого равна геометрической сумме скоростей составляющих движений.

Если оба составляющие движения (относительное и переносное) являются вращательными движениями с угловыми скоростями ω_1 и ω_2 вокруг параллельных осей z_1 и z_2 , причём эти вращения направлены в одну сторону (фиг. 32, а), то в этом случае абсолютное движение тела является вращением вокруг мгновенной оси с угловой скоростью $\Omega = \omega_1 + \omega_2$ (фиг. 32, б). Эта мгновенная ось вращения ζ параллельна данным осям z_1 и z_2 и делит расстояние между ними внутренним образом на части, обратно пропорциональные



Фиг. 33

данным угловым скоростям, т. е. $\frac{O_1O}{OO_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$. Если составляющие вращения вокруг

параллельных осей направлены в разные стороны, то абсолютная угловая скорость Ω равна разности угловых скоростей этих составляющих вращений; мгновенная ось вращения тела делит в этом случае расстояние O_1O_2 в отношении $\frac{\omega_2}{\omega_1}$ внешним образом.

Если векторы угловых скоростей $\vec{\omega}_1$ и $\vec{\omega}_2$ равны по величине, параллельны и направлены в разные стороны, т. е. $\vec{\omega}_1 = -\vec{\omega}_2$, то они образуют пару угловых скоростей (пару вращений); в этом случае абсолютное движение тела является поступательным, скорость которого равна (по величине и направлению) вектору-моменту этой пары.

Если оси z_1 и z_2 переносного и относительного вращений пересекаются в неподвижной точке O , то в этом случае абсолют-

ное движение тела является вращением вокруг мгновенной оси, проходящей через эту неподвижную точку. Абсолютная угловая скорость вращения тела вокруг мгновенной оси равна (по величине и направлению) диагонали параллелограмма, построенного на относительной и переносной угловых скоростях, т. е. $\vec{\Omega} = \vec{\omega}_1 + \vec{\omega}_2$ (фиг. 33).

Из этих результатов следует, что угловые скорости складываются так же, как в статике складываются силы (параллельные или сходящиеся).

ДИНАМИКА

ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Дифференциальные уравнения движения точки. В основе классической динамики лежат следующие законы — «аксиомы движения» — Галилея—Ньютона: 1) закон инерции; 2) закон зависимости между силой и количеством движения; 3) закон равенства действия и противодействия и 4) закон независимости действия (закон сложения) сил.

Согласно второму закону

$$\vec{F} = m\vec{a},$$

где m — масса материальной точки; \vec{a} — её ускорение и \vec{F} — действующая на эту точку сила. В скалярной форме (т. е. в проекциях на три координатные оси) этот закон выражается следующими тремя уравнениями:

$$\begin{aligned} m a_x &= F_x & m \frac{d^2 x}{dt^2} &= X; \\ m a_y &= F_y & \text{или} & \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} = Y; \\ m a_z &= F_z & m \frac{d^2 z}{dt^2} &= Z. \end{aligned}$$

Эти уравнения, называемые дифференциальными уравнениями движения материальной точки, являются основными уравнениями динамики точки. При помощи этих уравнений решаются обе основные задачи динамики точки, а именно:

Первая задача. Зная движение точки и её массу, найти силу, действующую на эту точку.

Вторая задача. Зная массу точки и действующую на неё силу, найти движение этой точки.

Если движение точки задано кинематическими уравнениями

$$x = f_1(t), \quad y = f_2(t), \quad z = f_3(t),$$

то, дифференцируя два раза по t эти уравнения, находят проекции ускорения точки a_x , a_y и a_z на координатные оси; умножая эти проекции на массу точки m , получают проекции действующей на точку силы и по этим проекциям определяют величину и направление этой силы.

Если, наоборот, известны проекции действующей силы X , Y , Z , а требуется найти движение точки, т. е. найти её координаты x , y , z как функции времени t , то решение

этой второй основной задачи динамики сводится к интегрированию дифференциальных уравнений движения точки.

При интегрировании этих уравнений появляются произвольные постоянные C_i (в общем случае их будет шесть), значения которых определяются по начальным условиям движения точки, т. е. по её начальному положению (по её координатам x_0 , y_0 , z_0 в начальный момент движения) и по её начальной скорости \vec{v}_0 , которая задаётся тремя её проекциями v_{0x} , v_{0y} и v_{0z} на координатные оси.

Масса. Когда материальная точка свободно падает по вертикали (в пустоте) под действием только силы тяжести, то действующая сила P есть вес материальной точки, а ускорение $a = g = 9,81 \text{ м/сек}^2 = 981 \text{ см/сек}^2$. Поэтому

$$P = mg,$$

откуда

$$m = \frac{P}{g}.$$

Эта формула позволяет определять массу точки (тела) по её весу; таким образом, определение массы тела сводится к его взвешиванию.

Свободное падение материальной точки в пустоте. Так как в этом случае ускорение постоянно, то движение точки является равномерно-ускоренным, а потому скорость точки и пройденный её путь определяются по формулам

$$v = v_0 + gt \quad \text{и} \quad s = v_0 t + \frac{1}{2} gt^2,$$

где v_0 — начальная скорость точки. Если $v_0 = 0$, то $v = gt$ и $s = \frac{1}{2} gt^2$; исключив от-

сюда t , получим $v = \sqrt{2gs}$. Если высота падения точки равна h , то её скорость при падении на землю равна $v = \sqrt{2gh}$.

Если точка брошена (в пустоте) по вертикали вверх с начальной скоростью v_0 , то её движение будет равномерно-замедленным, а потому в этом случае

$$v = v_0 - gt, \quad s = v_0 t - \frac{1}{2} gt^2.$$

Время T , по истечении которого точка достигает наибольшей высоты подъёма, определяется из того условия, что в момент

$t = T$ скорость точки равна нулю; следовательно,

$$T = \frac{v_0}{g}.$$

Наибольшая высота подъёма равна

$$h = v_0 T - \frac{1}{2} g T^2 = \frac{v_0^2}{2g}.$$

Падение материальной точки в сопротивляющейся среде. Материальная точка весом $P = mg$ свободно падает по вертикали с высоты h . Сила сопротивления воздуха пропорциональна квадрату скорости точки, т. е. величина этой силы равна kv^2 , где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от плотности воздуха (для тела конечных размеров этот коэффициент зависит также от формы тела и от площади его наибольшего поперечного сечения и определяется из опыта).

Найти скорость точки при падении на землю, если её начальная скорость $v_0 = 0$.

Если примем начальное положение точки за начало координат и направим ось z по вертикали вниз, то дифференциальное уравнение движения точки имеет вид

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = mg - kv^2,$$

или, принимая во внимание, что $\frac{dz}{dt} = v_z = v$:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - kv^2.$$

Так как нам нужно найти зависимость между скоростью и высотой падения, то из этого уравнения нужно исключить время, что можно сделать, заменяя dt через $\frac{dz}{v}$; тогда

$$mv \frac{dv}{dz} = mg - kv^2,$$

или

$$v \frac{dv}{dz} = g \left(1 - \frac{k}{mg} v^2 \right).$$

Если обозначим через c скорость точки, при которой сила сопротивления воздуха равна весу точки, то

$$kc^2 = mg$$

и

$$\frac{k}{mg} = \frac{1}{c^2},$$

а потому предыдущее уравнение принимает вид

$$v \frac{dv}{dz} = g \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = \frac{g}{c^2} (c^2 - v^2),$$

или

$$\frac{v dv}{c^2 - v^2} = \frac{g}{c^2} dz.$$

Интеграл этого уравнения будет

$$\ln(c^2 - v^2) = -\frac{2g}{c^2} z + C.$$

Постоянная C определяется из того условия, что в начальный момент (при $z = 0$) ско-

рость $v_0 = 0$; следовательно, $C = \ln c^2$, а потому

$$\ln \frac{c^2 - v^2}{c^2} = -\frac{2g}{c^2} z,$$

откуда

$$c^2 - v^2 = c^2 e^{-\frac{2g}{c^2} z}$$

и

$$v = c \sqrt{1 - e^{-\frac{2g}{c^2} z}}.$$

Полагая здесь $z = h$, получим ответ задачи;

если высота h велика, то член $e^{-\frac{2g}{c^2} h}$ мал в сравнении с единицей, и тогда с достаточной точностью можно принять, что скорость при падении на землю будет равна c . Из полученной формулы для v следует, что

$$\lim_{z \rightarrow \infty} v = c.$$

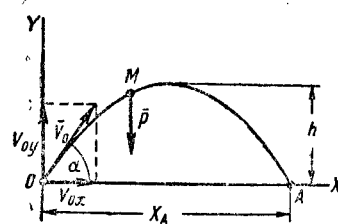
Поэтому скорость c называют предельной скоростью.

Криволинейное движение тяжёлой точки в пустоте. Материальная точка M (например, пуля) брошена с начальной скоростью v_0 под углом α к горизонту. Найти движение этой точки, пренебрегая силой сопротивления воздуха.

Примем начальное положение точки за начало координат O , ось y направим по вертикали вверх, а горизонтальную ось x направим так, чтобы вектор \vec{v}_0 лежал в плоскости Oxy ; тогда угол вектора \vec{v}_0 с осью x будет равен α (фиг. 34).

Дифференциальные уравнения движения точки имеют вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = 0; \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} = -mg,$$



Фиг. 34

или

$$\frac{dv_x}{dt} = 0; \quad \frac{dv_y}{dt} = -g.$$

Интегрируя эти уравнения, находим

$$v_x = C_1; \quad v_y = -gt + C_2.$$

Первое из этих равенств показывает, что проекция скорости на ось x остаётся постоянной. Так как в начальный момент (при $t = 0$)

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha \quad \text{и} \quad v_{0y} = v_0 \sin \alpha,$$

то

$$C_1 = v_0 \cos \alpha \quad \text{и} \quad C_2 = v_0 \sin \alpha,$$

а потому

$$v_x = v_0 \cos \alpha, \quad v_y = v_0 \sin \alpha - gt,$$

или

$$\frac{dx}{dt} = v_0 \cos \alpha, \quad \frac{dy}{dt} = v_0 \sin \alpha - gt.$$

Интегрируя эти уравнения, находим

$$x = v_0 \cos \alpha \cdot t + C_3;$$

$$y = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} gt^2 + C_4.$$

Так как в начальный момент точка находится в начале координат, то $x_0 = y_0 = 0$, а потому $C_3 = C_4 = 0$ и, следовательно,

$$x = v_0 \cos \alpha \cdot t; \quad y = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} gt^2.$$

Эти уравнения, выражающие координаты точки в функциях времени, полностью определяют движение точки. Если исключить из этих уравнений время t , то уравнение траектории точки будет

$$y = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} \text{ (парабола)}.$$

Полагая $y = 0$, находят из этого уравнения абсциссу точки A , в которой траектория пересекает ось x , т. е. так называемую дальность полёта

$$x_A = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\alpha.$$

Продолжительность полёта T определяется из уравнения

$$x_A = v_0 \cos \alpha \cdot T,$$

откуда

$$T = \frac{2v_0}{g} \sin \alpha.$$

Наибольшая высота подъёма равна

$$h = y_{\max} = -\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$

Гармоническое колебание материальной точки. Груз весом P кг подвешен на вертикальной пружине, длина которой в естественном состоянии равна l_0 (фиг. 35). Приняв за начало координат O положение равновесия груза, т. е. то положение, в котором вес груза уравновешивается силой реакции пружины, ось y направим по вертикали вверх. Если обозначить удлинение пружины через λ , а её статическое удлинение, т. е. расстояние от конца нерастянутой пружины до положения равновесия O , — через λ_{cm} , то $\lambda = \lambda_{cm} - y$.

По закону Гука сила натяжения пружины пропорциональна её удлинению, т. е. величина этой силы равна $c\lambda$, где c — постоянный для данной пружины коэффициент пропорциональности (жёсткость пружины). В положении равновесия имеем

$$c\lambda_{cm} = P,$$

откуда

$$c = \frac{P}{\lambda_{cm}} \text{ и } \lambda_{cm} = \frac{P}{c}.$$

Дифференциальное уравнение движения груза имеет вид

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = c\lambda - P,$$

или, заменяя λ через $\lambda_{cm} - y$,

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -cy.$$

Вводя обозначение $\frac{c}{m} = k^2$, приводят это уравнение к виду

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + k^2 y = 0.$$

Общее решение этого уравнения имеет вид

$$y = a \sin(kt + \alpha),$$

где a и α — произвольные постоянные; в этом легко убедиться, подставляя это значение y в предыдущее дифференциальное уравнение, которое в результате этой подстановки обращается в тождество. Отсюда следует, что движение груза есть гармоническое колебание около положения равновесия. Величина a называется амплитудой колебания; аргумент $kt + \alpha$ называется фазой колебания; значение фазы при $t = 0$, т. е. величина α , называется начальной фазой колебания. Величина $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$ есть частота колебания.

Период колебания равен

$$T = \frac{2\pi}{k} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{c}}.$$

Если принять во внимание, что

$$m = \frac{P}{g} \text{ и } c = \frac{P}{\lambda_{cm}},$$

то

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\lambda_{cm}}{g}}.$$

Скорость груза равна

$$v = \frac{dy}{dt} = ak \cos(kt + \alpha).$$

Если в начальный момент (при $t = 0$) $y = y_0$ и $v = v_0$, то

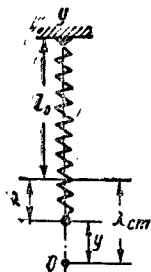
$$y_0 = a \sin \alpha \text{ и } v_0 = ak \cos \alpha;$$

отсюда

$$a = \sqrt{y_0^2 + \frac{v_0^2}{k^2}}; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{ky_0}{v_0}.$$

Эти формулы определяют амплитуду и начальную фазу колебания по начальным условиям движения груза. Если $v_0 = 0$, то $a = y_0$, $\alpha = \frac{\pi}{2}$ и, следовательно, в этом случае

$$y = y_0 \sin\left(kt + \frac{\pi}{2}\right) = y_0 \cos(kt).$$



Фиг. 35

Количество движения. Импульс силы. Теорема о количестве движения. Количество движения материальной точки называется векторная величина, равная $m\bar{v}$, где m — масса точки и \bar{v} — её скорость; направление вектора $m\bar{v}$ совпадает с направлением скорости \bar{v} . Согласно второму закону динамики

$$m\bar{a} = \bar{F},$$

но

$$\bar{a} = \frac{d\bar{v}}{dt},$$

а потому

$$\frac{d}{dt}(m\bar{v}) = \bar{F}, \text{ или } d(m\bar{v}) = \bar{F} dt.$$

Произведение $\bar{F} dt$ называется элементарным импульсом силы; направление элементарного импульса совпадает с направлением силы \bar{F} . Интегрируя предыдущее уравнение, получают

$$m\bar{v} - m\bar{v}_0 = \int_0^t \bar{F} dt.$$

Векторный интеграл, стоящий в правой части этого равенства, называется импульсом силы \bar{F} за время t .

Если ввести обозначение $\int_0^t \bar{F} dt = \bar{S}$, то

$m\bar{v} - m\bar{v}_0 = \bar{S}$, т. е. изменение количества движения материальной точки за данное время равно импульсу приложенной к ней силы за то же время (теорема о количестве движения). В скалярной форме (в проекциях на координатные оси) эта теорема выражается следующими уравнениями:

$$mv_x - mv_{0x} = S_x = \int_0^t X dt; mv_y - mv_{0y} = S_y = \int_0^t Y dt; mv_z - mv_{0z} = S_z = \int_0^t Z dt,$$

т. е. изменение проекции количества движения материальной точки на данную неподвижную ось равно проекции на ту же ось импульса силы, приложенной к этой точке.

Если к точке приложено несколько сил, то в правых частях предыдущих уравнений нужно писать сумму (геометрическую) импульсов всех этих сил или сумму (алгебраическую) проекций этих импульсов на данную ось.

Если $\bar{F} = \text{const}$, т. е. если сила сохраняет постоянную величину и постоянное направление, то

$$m\bar{v} - m\bar{v}_0 = \bar{F} \cdot t.$$

ДИНАМИКА СИСТЕМЫ

Количество движения системы. Если имеем не одну материальную точку, а механическую систему, т. е. совокупность материальных точек, в которой движение каждой точки зависит от положения и движения остальных (например, абсолютно твёр-

дое тело), то количеством движения системы называется сумма (геометрическая) количеств движения всех материальных точек этой системы. Следовательно, количество движения системы

$$\bar{Q} = \sum m\bar{v}.$$

Отсюда проекции количества движения системы на координатные оси:

$$Q_x = \sum mv_x; Q_y = \sum mv_y; Q_z = \sum mv_z.$$

Все силы, действующие на материальные точки данной механической системы, можно разделить на две категории: силы внешние и силы внутренние. Внутренними силами называются силы взаимодействия между материальными точками данной системы. Внешними силами называются силы, с которыми действуют на данную систему материальные точки или тела, не принадлежащие к этой системе. Так, например, для движущегося паровоза, рассматриваемого как одна система, его вес, нормальная реакция рельсов, трение между рельсами и бандажами колёс, сопротивление воздуха — все эти силы являются внешними; к внутренним силам будут относиться давление пара на стенки котла и на поршень, а также силы трения, возникающие между отдельными частями паровоза. Поскольку внутренние силы являются силами взаимодействия между материальными точками системы, эти силы согласно закону равенства действия и противодействия всегда попарно равны по величине и направлены по одной прямой в противоположные стороны. Отсюда следует, что сумма всех внутренних сил системы всегда равна нулю.

Из равенства $\bar{Q} = \sum m\bar{v}$ следует

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} = \sum m \frac{d\bar{v}}{dt} = \sum m\bar{a}.$$

По второму закону динамики

$$m\bar{a} = \bar{F}_e + \bar{F}_i,$$

где \bar{F}_e обозначает равнодействующую всех внешних сил и \bar{F}_i — равнодействующую всех внутренних сил, приложенных к данной материальной точке системы. Следовательно,

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} = \sum \bar{F}_e + \sum \bar{F}_i, \text{ но } \sum \bar{F}_i = 0,$$

а потому

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} = \sum \bar{F}_e,$$

т. е. производная по времени от количества движения системы равна сумме всех внешних сил или, что то же, равна главному вектору внешних сил, действующих на эту систему.

Этот результат представляет собой обобщение второго закона динамики на систему. В скалярной форме этот результат выражается следующими уравнениями:

$$\frac{dQ_x}{dt} = \sum X_e; \frac{dQ_y}{dt} = \sum Y_e; \frac{dQ_z}{dt} = \sum Z_e,$$

т. е. производная по времени от проекции количества движения системы на данную неподвижную ось равна сумме проекций на ту же ось всех внешних сил, действующих на эту систему.

Если $\Sigma \bar{F}_e = 0$, то $\frac{d\bar{Q}}{dt} = 0$ и, следовательно,

$\bar{Q} = \text{const}$, т. е. если сумма внешних сил системы всё время равна нулю, то количество движения системы остаётся постоянным (случай сохранения количества движения системы). Аналогично, если $\Sigma X_e = 0$ (если, например, все внешние силы перпендикулярны к оси x), то $Q_x = \text{const}$ (случай сохранения проекции количества движения системы на данную ось).

Из равенства

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} = \Sigma \bar{F}_e$$

следует

$$d\bar{Q} = \Sigma \bar{F}_e dt,$$

откуда, после интегрирования,

$$\bar{Q} - \bar{Q}_0 = \Sigma \int_0^t \bar{F}_e dt = \Sigma \bar{S}_e,$$

т. е. изменение количества движения системы равно сумме (геометрической) импульсов всех внешних сил, действующих на эту систему (теорема о количестве движения системы). В скалярной форме эта теорема выражается следующими уравнениями:

$$Q_x - Q_{0x} = \Sigma \int_0^t X_e dt = \Sigma S_{ex};$$

$$Q_y - Q_{0y} = \Sigma \int_0^t Y_e dt = \Sigma S_{ey};$$

$$Q_z - Q_{0z} = \Sigma \int_0^t Z_e dt = \Sigma S_{ez},$$

т. е. изменение проекции количества движения системы на данную неподвижную ось равно сумме (алгебраической) проекций на ту же ось импульсов всех внешних сил, действующих на эту систему.

Центр масс системы. Теорема о движении центра масс. Координаты центра тяжести C системы (в частности, твёрдого тела) определяются по формулам (см. «Статика»):

$$x_C = \frac{\Sigma Px}{\Sigma P}; \quad y_C = \frac{\Sigma Py}{\Sigma P}; \quad z_C = \frac{\Sigma Pz}{\Sigma P},$$

где через P обозначены веса материальных точек системы (материальных частиц твёрдого тела), а x, y, z — координаты этих точек. Если заменить здесь P через mg , то по сокращении на общий множитель g получим:

$$x_C = \frac{\Sigma mx}{M}; \quad y_C = \frac{\Sigma my}{M}; \quad z_C = \frac{\Sigma mz}{M},$$

где $M = \Sigma m$ — масса всей системы. Геометрическая точка, координаты которой определяются по этим формулам и положение которой зависит только от масс материальных точек данной системы и от их положения в данный момент, называется **центром**

масс системы. Если система находится в поле силы тяжести, то центр масс этой системы совпадает, очевидно, с её центром тяжести. Из предыдущих равенств находят:

$$\Sigma mx = Mx_C; \quad \Sigma my = My_C; \quad \Sigma mz = Mz_C,$$

откуда

$$\Sigma m \frac{dx}{dt} = M \frac{dx_C}{dt}; \quad \Sigma m \frac{dy}{dt} = M \frac{dy_C}{dt};$$

$$\Sigma m \frac{dz}{dt} = M \frac{dz_C}{dt},$$

или

$$\Sigma mv_x = Mv_{Cx}; \quad \Sigma mv_y = Mv_{Cy}; \quad \Sigma mv_z = Mv_{Cz},$$

или

$$Q_x = Mv_{Cx}, \quad Q_y = Mv_{Cy}, \quad Q_z = Mv_{Cz},$$

где v_{Cx}, v_{Cy}, v_{Cz} обозначают проекции скорости v_C центра масс системы.

Из этих равенств, выражающих равенство проекций на координатные оси двух векторов \bar{Q} и $M\bar{v}_C$, вытекает равенство этих векторов; следовательно, $\bar{Q} = M\bar{v}_C$, т. е. количество движения системы равно (по величине и направлению) количеству движения центра масс этой системы, если предположить, что в этом центре сосредоточена вся масса системы. Поэтому, например, количество движения колеса, катящегося по рельсу, равно произведению массы колеса на скорость его центра тяжести.

Если твёрдое тело вращается вокруг неподвижной оси, и если центр тяжести C этого тела лежит на оси вращения, то количество движения тела будет равно нулю, так как в этом случае $v_C = 0$.

Из равенства $Q_x = Mv_{Cx}$ следует, что

$$\frac{dQ_x}{dt} = M \frac{dv_{Cx}}{dt} = M \frac{d^2x_C}{dt^2}, \quad \text{но} \quad \frac{dQ_x}{dt} = \Sigma X_e,$$

а потому

$$M \frac{d^2x_C}{dt^2} = \Sigma X_e$$

и аналогично

$$M \frac{d^2y_C}{dt^2} = \Sigma Y_e; \quad M \frac{d^2z_C}{dt^2} = \Sigma Z_e.$$

Эти уравнения называются дифференциальными уравнениями движения центра масс системы.

Отсюда следует теорема о движении центра масс: *центр масс (центр тяжести) системы движется так же, как материальная точка, масса которой равна массе всей системы и к которой приложены все внешние силы, действующие на эту систему.* Поэтому, например, центр тяжести тела, брошенного под углом к горизонту (в пустоте), описывает всегда параболу.

Из этой теоремы следует: 1) внутренние силы системы не влияют на движение её центра масс; 2) при отсутствии внешних сил центр масс системы или остаётся неподвижным, или движется прямолинейно и равномерно. Поэтому, например, силы трения между рельсами и ведущими колёсами паровоза являются теми внешними горизонтальными силами, благодаря которым оказы-

вается возможным перемещение паровоза в горизонтальном направлении; на абсолютно гладких рельсах движение паровоза было бы невозможно.

Момент количества движения. Наряду с моментами сил в динамике приходится рассматривать моменты количества движения, т. е. моменты вектора $m\vec{v}$ относительно данной точки или данной оси, причём эти моменты определяются аналогично моментам силы.

Моментом количества движения относительно точки O называется вектор, имеющий начало в точке O и перпендикулярный к плоскости, в которой лежат точка O и вектор $m\vec{v}$. Модуль этого вектора равен произведению модуля вектора $m\vec{v}$ на длину перпендикуляра, опущенного из точки O на линию вектора $m\vec{v}$, или, что то же, модуль вектора $mom_0(m\vec{v})$ равен удвоенной площади треугольника, основанием которого является вектор $m\vec{v}$, а противоположная вершина совпадает с точкой O . Проекция вектора $mom_0(m\vec{v})$ на какую-нибудь ось, проходящую через точку O , равна моменту количества движения $m\vec{v}$ относительно этой оси. Моменты количества движения относительно координатных осей x, y, z определяются по тем же формулам, как и моменты силы, но в этих формулах проекции силы X, Y, Z нужно заменить проекциями mv_x, mv_y, mv_z количества движения на координатные оси; следовательно:

$$mom_x(m\vec{v}) = y \cdot mv_z - z \cdot mv_y = \\ = m \left(y \frac{dz}{dt} - z \frac{dy}{dt} \right);$$

$$mom_y(m\vec{v}) = z \cdot mv_x - x \cdot mv_z = \\ = m \left(z \frac{dx}{dt} - x \frac{dz}{dt} \right);$$

$$mom_z(m\vec{v}) = x \cdot mv_y - y \cdot mv_x = \\ = m \left(x \frac{dy}{dt} - y \frac{dx}{dt} \right).$$

Дифференцируя первое из этих равенств по времени, получим:

$$\frac{d}{dt} mom_x(m\vec{v}) = m \left(\frac{dy}{dt} \cdot \frac{dz}{dt} + y \frac{d^2 z}{dt^2} - \right. \\ \left. - \frac{dz}{dt} \cdot \frac{dy}{dt} - z \frac{d^2 y}{dt^2} \right) = m \left(y \frac{d^2 z}{dt^2} - z \frac{d^2 y}{dt^2} \right).$$

Но

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = Z \text{ и } m \frac{d^2 y}{dt^2} = Y,$$

потому

$$\frac{d}{dt} mom_x(m\vec{v}) = yZ - zY = mom_x(\vec{F}).$$

Аналогично

$$\frac{d}{dt} mom_y(m\vec{v}) = zX - xZ = mom_y(\vec{F});$$

$$\frac{d}{dt} mom_z(m\vec{v}) = xY - yX = mom_z(\vec{F}).$$

Эти уравнения выражают теорему о моменте количества движения: *производная по времени от момента количества движения материальной точки относительно данной неподвижной оси равна моменту действующей на эту точку силы относительно той же оси.*

Так как моменты вектора $m\vec{v}$ относительно осей x, y, z равны проекциям на эти оси вектора $mom_0(m\vec{v})$, то из предыдущих трёх скалярных уравнений вытекает векторное равенство

$$\frac{d}{dt} mom_0(m\vec{v}) = mom_0(\vec{F}),$$

выражающее ту же теорему в векторной форме, т. е. *производная по времени от момента количества движения материальной точки относительно данного неподвижного центра равна моменту действующей на эту точку силы относительно того же центра.*

Если на материальную точку действуют несколько сил, то на основании теоремы Вариньона в правых частях предыдущих уравнений нужно писать сумму (геометрическую) моментов данного центра или сумму (алгебраическую) их моментов относительно данной оси. В случае системы материальных точек, кинетическим моментом системы относительно данной точки или данной оси называется главный момент количеств движения всех материальных точек системы относительно этой точки или этой оси. Следовательно, если обозначить кинетический момент системы относительно точки O (начала координат) через \bar{G}_0 , а кинетические моменты системы относительно координатных осей через G_x, G_y, G_z , то

$$\bar{G}_0 = \Sigma mom_0(m\vec{v}); G_x = \Sigma mom_x(m\vec{v});$$

$$G_y = \Sigma mom_y(m\vec{v});$$

$$G_z = \Sigma mom_z(m\vec{v}).$$

Дифференцируя первое из этих равенств по времени, получим

$$\frac{d\bar{G}_0}{dt} = \Sigma \frac{d}{dt} mom_0(m\vec{v}),$$

но на основании предыдущей теоремы

$$\frac{d}{dt} mom_0(m\vec{v}) = mom_0(\vec{F}_e) + mom_0(\vec{F}_i),$$

а потому

$$\frac{d\bar{G}_0}{dt} = \Sigma mom_0(\vec{F}_e) + \Sigma mom_0(\vec{F}_i).$$

Так как внутренние силы системы попарно равны по величине и направлены по одной прямой в противоположные стороны, то сумма их моментов относительно любой точки (или любой оси) всегда равна нулю. Следовательно,

$$\frac{d\bar{G}_0}{dt} = \Sigma mom_0(\vec{F}_e),$$

т. е. *производная по времени от кинетического момента системы относительно данного неподвижного центра равна главному*

моменту внешних сил, действующих на систему, относительно того же центра (теорема о кинетическом моменте системы).

Аналогично получают три скалярных уравнения, выражающих ту же теорему в скалярной форме:

$$\begin{aligned}\frac{dG_x}{dt} &= \Sigma \text{mom}_x (\bar{F}_e), \quad \frac{dG_y}{dt} = \\ &= \Sigma \text{mom}_y (\bar{F}_e), \quad \frac{dG_z}{dt} = \Sigma \text{mom}_z (\bar{F}_e),\end{aligned}$$

т. е. производная по времени от кинетического момента системы относительно данной неподвижной оси равна главному моменту внешних сил, действующих на систему, относительно той же оси.

Если

$$\Sigma \text{mom}_0 (\bar{F}_e) = 0,$$

то

$$\frac{d\bar{G}_0}{dt} = 0,$$

и, следовательно,

$$\bar{G}_0 = \text{const},$$

т. е. если главный момент внешних сил относительно данного центра всё время равен нулю, то кинетический момент системы относительно этого центра остаётся постоянным (случай сохранения кинетического момента системы). Аналогично: если

$$\Sigma \text{mom}_z (\bar{F}_e) = 0,$$

то

$$G_z = \text{const},$$

т. е. если главный момент внешних сил относительно данной оси всё время равен нулю, то кинетический момент системы относительно этой оси остаётся постоянным.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Работа. Если материальная точка $M(x, y, z)$, на которую действует сила \bar{F} , проходит элементарный путь ds , переместившись в положение $M'(x+dx, y+dy, z+dz)$, то работа силы \bar{F} на этом пути (элементарная работа) равна

$$\delta A = F \cos \varphi ds,$$

где φ — угол между направлением силы \bar{F} и направлением скорости \bar{v} точки M , или (в аналитической форме)

$$\delta A = X dx + Y dy + Z dz,$$

где X, Y, Z — проекции силы \bar{F} на координатные оси.

Работа A на конечном пути при перемещении точки M из положения M_1 в положение M_2 выражается криволинейным интегралом, взятым вдоль траектории этой точки, т. е.

$$\begin{aligned}A &= \int_{(M_1)}^{(M_2)} F \cos \varphi ds = \\ &= \int_{(M_1)}^{(M_2)} X dx + Y dy + Z dz.\end{aligned}$$

Если точка M перемещается по прямой линии и сила \bar{F} направлена по этой прямой, то $\varphi = 0$ или $\varphi = 180^\circ$, а потому в этом случае $\delta A = \pm F ds$ и $A = \pm \int_0^s F ds$; если

$F = \text{const}$, то $A = \pm Fs$. Если $\bar{F} \perp \bar{v}$, то $\cos \varphi = 0$, а потому $\delta A = 0$.

Пусть точка M перемещается из положения $M_1(x_1, y_1, z_1)$ в положение $M_2(x_2, y_2, z_2)$ под действием силы тяжести. Если обозначить вес этой точки через P , а ось z направить по вертикали вверх, то $X=Y=0$ и $Z=-P$, а потому

$$\delta A = -P dz \quad \text{и} \quad A = - \int_{z_1}^{z_2} P dz = P(z_1 - z_2),$$

т. е. работа силы тяжести равна произведению веса материальной точки на разность высот этой точки в начальном и конечном положениях, причём эти высоты отсчитываются от произвольно выбранной горизонтальной плоскости. Отсюда следует, что работа силы тяжести не зависит ни от длины, ни от вида траектории, по которой перемещается точка из начального положения в конечное.

В случае твёрдого тела конечных размеров в полученной формуле для работы A под z_1 и z_2 нужно понимать координаты центра тяжести тела.

Теорема кинетической энергии. Кинетической энергией (живой силой) движущейся материальной точки называется скалярная величина, равная половине произведения массы этой точки на квадрат её скорости, т. е. величина $\frac{mv^2}{2}$.

Чтобы установить зависимость между изменением кинетической энергии материальной точки и работой действующей на эту точку силы \bar{F} , возьмём основное уравнение динамики, выражающее второй закон Ньютона:

$$ma = F.$$

Проектируя это векторное уравнение на направление касательной к траектории точки, получим

$$ma_t = F_t,$$

но

$$a_t = \frac{dv}{dt}$$

(см. «Кинематика». Криволинейное движение точки) и

$$F_t = F \cos \varphi,$$

а потому

$$m \frac{dv}{dt} = F \cos \varphi.$$

Умножая обе части этого уравнения на ds получим

$$m \frac{dv}{dt} ds = F \cos \varphi ds,$$

или

$$mvdv = F \cos \varphi ds = \delta A.$$

Интегрируя это уравнение, находим

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = \int_{(M_0)}^{(M)} F \cos \varphi \, ds,$$

или

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = A,$$

т. е. изменение кинетической энергии материальной точки равно работе силы, действующей на эту точку (теорема кинетической энергии).

Если на точку действуют несколько сил, то в этом случае в правой части предыдущего уравнения нужно писать алгебраическую сумму работ всех этих сил на данном пути.

Кинетической энергией системы материальных точек называется сумма $\sum \frac{mv^2}{2}$, где суммирование распространяется на все материальные точки системы; следовательно, если обозначим кинетическую энергию системы через T , то

$$T = \sum \frac{mv^2}{2}.$$

Написав уравнение кинетической энергии для каждой материальной точки системы и сложив затем эти уравнения, получим

$$T - T_0 = \Sigma A,$$

т. е. изменение кинетической энергии системы равно сумме работ всех сил, действующих на эту систему, как внешних, так и внутренних.

При стационарных (т. е. не изменяющихся с течением времени) связях без трения силы реакции таких связей в уравнение кинетической энергии не войдут, так как работа этих сил равна нулю (например, при движении материальной точки по гладкой, неподвижной поверхности работа нормальной реакции этой поверхности равна нулю, так как эта реакция перпендикулярна к направлению скорости точки). В тех случаях, когда трением пренебречь нельзя, в правую часть уравнения кинетической энергии войдёт работа сил трения.

Пусть данная система представляет собой абсолютно твёрдое тело. При поступательном движении этого тела скорости всех его точек равны, а потому в этом случае

$$T = \sum \frac{mv^2}{2} = \frac{v^2}{2} \sum m = \frac{Mv^2}{2},$$

где M — масса тела, а v — скорость любой его точки, например центра тяжести. Если твёрдое тело вращается вокруг оси z с угловой скоростью ω , то скорость v всякой его точки равна $r\omega$, где r есть расстояние этой точки от оси z , а потому в этом случае

$$\begin{aligned} T &= \sum \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} \sum mr^2 \omega^2 = \\ &= \frac{\omega^2}{2} \sum mr^2, \end{aligned}$$

но $\Sigma mr^2 = J_z$ (момент инерции тела относительно оси z) и, следовательно, $T = J_z \frac{\omega^2}{2}$,

т. е. кинетическая энергия твёрдого тела, вращающегося вокруг данной оси, равна половине произведения квадрата его угловой скорости на момент инерции тела относительно оси вращения.

В общем случае движение твёрдого тела можно разложить на два движения: 1) поступательное, скорость которого равна скорости \bar{v}_c центра тяжести этого тела, и 2) вращательное с угловой скоростью ω вокруг некоторой оси, проходящей через центр тяжести C этого тела («Кинематика», стр. 374). В этом случае кинетическая энергия твёрдого тела определяется по формуле

$$T = \frac{Mv_c^2}{2} + J \frac{\omega^2}{2},$$

где первое слагаемое выражает кинетическую энергию тела в поступательном движении, а второе слагаемое — кинетическую энергию тела во вращательном движении (J обозначает момент инерции тела относительно оси вращения, проходящей через центр тяжести тела).

Если данная система находится в потенциальном силовом поле, то проекции на координатные оси сил, действующих на материальные точки этой системы, равны частным производным от потенциальной энергии Π по соответствующим координатам, взятым с обратным знаком, т. е.

$$X_k = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_k}; Y_k = -\frac{\partial \Pi}{\partial y_k}; Z_k = -\frac{\partial \Pi}{\partial z_k}.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \Sigma \delta A &= \sum_{(k)} (X_k dx_k + Y_k dy_k + Z_k dz_k) = \\ &= - \sum_{(k)} \left(\frac{\partial \Pi}{\partial x_k} dx_k + \frac{\partial \Pi}{\partial y_k} dy_k + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial \Pi}{\partial z_k} dz_k \right) = -d\Pi, \end{aligned}$$

откуда, интегрируя, находим

$$\Sigma A = -(\Pi_2 - \Pi_1) = \Pi_1 - \Pi_2,$$

т. е. работа сил потенциального поля при перемещении системы из положения I в положение II равна падению (уменьшению) потенциальной энергии.

Если при некотором определённом положении системы, называемом «нулевым» положением, считать потенциальную энергию равной нулю ($\Pi_0 = 0$), то при перемещении системы из данного положения в нулевое

$$\Sigma A = \Pi - \Pi_0 = \Pi.$$

Отсюда следует, что величина потенциальной энергии при данном положении системы представляет собой ту работу, которую совершают силы поля при перемещении системы из данного положения в нулевое.

В случае, например, упругого деформирования тела мы имеем поле сил упругости. Потенциальная энергия упруго-деформированного тела равна работе, которую совершают силы упругости при пере-

ходе тела из данного деформированного состояния в недеформированное. При естественном состоянии упругого тела, т. е. когда оно не деформировано, потенциальная энергия тела принимается равной нулю.

Закон сохранения механической энергии. Применяя теорему кинетической энергии к движению системы в потенциальном силовом поле, получим

$$T_2 - T_1 = \Sigma A = \Pi_1 - \Pi_2,$$

откуда

$$T_2 + \Pi_2 = T_1 + \Pi_1,$$

или

$$T + \Pi = \text{const},$$

т. е. при движении системы в потенциальном силовом поле сумма кинетической и потенциальной энергии остаётся постоянной (закон сохранения механической энергии). Этот результат верен, конечно, только в том случае, когда движение системы в данном потенциальном поле происходит без притока энергии извне и без потери энергии, происходящей вследствие наличия различных вредных сопротивлений, например, сил трения.

Примеры: 1. Система находится в поле силы тяжести. В этом случае потенциальная энергия

$$\Pi = Mgz_c,$$

где M — масса всей системы, а z_c — высота центра тяжести S системы, отсчитываемая от некоторой горизонтальной плоскости (например, от поверхности земли). Следовательно, в этом случае имеем

$$\Sigma \frac{mv^2}{2} + Mgz_c = \text{const}.$$

2. Потенциальная энергия сжатой или растянутой пружины

$$\Pi = \frac{c\lambda^2}{2},$$

где c — жёсткость пружины, а λ — сжатие или удлинение пружины. Следовательно, при вертикальных колебаниях груза, подвешенного на пружине (при отсутствии сопротивлений), будем иметь

$$\frac{mv^2}{2} + mgz_c + \frac{c}{2}\lambda^2 = \text{const}.$$

ПРИНЦИП ДАЛАМБЕРА

Для каждой материальной точки M_k ($k = 1, 2, \dots, n$) данной механической системы согласно второму основному закону динамики

$$m_k \bar{a}_k = \bar{F}_k + \bar{N}_k$$

или

$$\bar{F}_k + \bar{N}_k - m_k \bar{a}_k = 0,$$

где \bar{F}_k — равнодействующая всех заданных (активных) сил, приложенных к точке M_k , а \bar{N}_k — равнодействующая сил реакции связей, приложенных к той же точке.

Векторная величина — $m_k \bar{a}_k$ называется силой инерции материальной точки M_k . Следовательно, если обозначить силу инерции через $\bar{F}_{ин}^{(k)}$, то $\bar{F}_{ин}^{(k)} = -m_k \bar{a}_k$, т. е. сила инерции материальной точки равна по величине произведению массы этой точки на величину её ускорения и направлена противоположно ускорению. Предыдущее уравнение принимает вид

$$\bar{F}_k + \bar{N}_k + \bar{F}_{ин}^{(k)} = 0,$$

откуда следует, что три силы \bar{F}_k , \bar{N}_k и $\bar{F}_{ин}^{(k)}$ уравновешиваются. То же имеет место и для всех остальных точек системы. Таким образом, приходим к следующему результату, который представляет собой принцип Даламбера: *в каждый данный момент заданные (активные) силы, действующие на систему, силы реакции связей и силы инерции уравновешиваются*. Отсюда следует, что система заданных сил, сил реакции связей и сил инерции удовлетворяет уравнениям статики твёрдого тела, т. е. сумма проекций всех этих сил на любую ось и сумма их моментов относительно любой точки или любой оси в каждый данный момент равна нулю. Проекция силы инерции материальной точки на координатные оси равны:

$$X_{ин} = -ma_x = -m \frac{d^2x}{dt^2};$$

$$Y_{ин} = -ma_y = -m \frac{d^2y}{dt^2},$$

$$Z_{ин} = -ma_z = -m \frac{d^2z}{dt^2}.$$

Проекция силы инерции на естественные оси (на касательную и главную нормаль траектории точки) равны

$$F_{ин}^{(t)} = -ma_t = -m \frac{dv}{dt}$$

и

$$F_{ин}^{(n)} = -ma_n = -\frac{mv^2}{\rho}.$$

Составляющие силы инерции по касательной и главной нормали называются соответственно касательной и нормальной силами инерции материальной точки. В случае движения точки по окружности нормальная составляющая сила инерции, направленная по радиусу окружности от центра, носит название центробежной силы.

Так как в этом случае скорость точки $v = r\omega$ и радиус кривизны траектории $\rho = r$, то величины касательной и нормальной сил инерции равны соответственно $mrv \epsilon$ и $mr\omega^2$, где r — радиус окружности, а $\epsilon = \frac{d\omega}{dt}$.

Нужно иметь в виду, что в действительности сила инерции не приложена к движущейся материальной точке; в действительности на точку действуют только силы \bar{F} и \bar{N} , которые и сообщают ей соответствующее ускорение.

Применяя же принцип Даламбера, мы прилагам к каждой материальной точке системы дополнительно (условно), для того, чтобы привести систему к состоянию равновесия и затем воспользоваться уравнениями статики. Этот приём часто оказывается весьма удобным при решении динамических задач, в особенности в кинестатике, т. е. в тех задачах, где требуется найти реакции связей при данном движении системы (так называемые кинетические реакции).

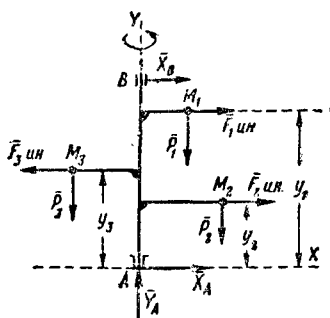
Объединяя принцип Даламбера с принципом возможных перемещений (см. «Статика»), приходим к заключению, что в слу-

чае идеальных связей сумма элементарных работ всех заданных (активных) сил, действующих на систему, и сил инерции при всяком виртуальном перемещении системы равна нулю, т. е.

$$\sum_{(K)} [(X_K + X_{ин}^{(K)}) \delta x_K + (Y_K + Y_{ин}^{(K)}) \delta y_K + (Z_K + Z_{ин}^{(K)}) \delta z_K] = 0$$

или

$$\sum_{(K)} \left[\left(X_K - m_K \frac{d^2 x_K}{dt^2} \right) \delta x_K + \left(Y_K - m_K \frac{d^2 y_K}{dt^2} \right) \delta y_K + \left(Z_K - m_K \frac{d^2 z_K}{dt^2} \right) \delta z_K \right] = 0.$$



Фиг. 36

Это уравнение называется общим уравнением динамики.

Пример. С вертикальной осью, укрепленной в подшипнике A и подшипнике B, жестко соединены три горизонтальных стержня длиной r_1, r_2, r_3 , несущие на концах грузы M_1, M_2 и M_3 , веса которых равны P_1, P_2 и P_3 . Расстояние $AB = h$. Вся система вращается с данной угловой скоростью $\omega = \text{const}$. Найти реакции в подшипнике A и подшипнике B, пренебрегая трением и массой стержней (фиг. 36).

Так как $\omega = \text{const}$, то $\epsilon = \frac{d\omega}{dt} = 0$, и следовательно, касательные силы инерции грузов равны нулю. Поэтому приложим к этим грузам только центробежные силы, равные

$$F_{1ин} = \frac{P_1}{g} r_1 \omega^2; F_{2ин} = \frac{P_2}{g} r_2 \omega^2; F_{3ин} = \frac{P_3}{g} r_3 \omega^2.$$

Горизонтальную и вертикальную реакции в подшипнике A обозначим соответственно через X_A и Y_A , а горизонтальную реакцию в подшипнике B обозначим через X_B . Так как система сил $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3$, сил реакции и центробежных сил согласно принципу Даламбера находится в равновесии, то, проектируя все эти силы на оси x и y и составляя сумму их моментов относительно точки A, получим следующие три уравнения:

$$1) X_A + X_B + (P_1 r_1 + P_2 r_2 + P_3 r_3) \frac{\omega^2}{g} = 0;$$

$$2) Y_A - P_1 - P_2 - P_3 = 0;$$

$$3) -h X_B + (P_1 y_1 P_3 - r_2 y_2 P_1 - r_1 y_1 P_1) \frac{\omega^2}{g} - P_1 r_1 - P_2 r_2 + P_3 r_3 = 0.$$

Отсюда находим искомые реакции X_A, Y_A и X_B .

Для того чтобы значения этих реакций совпадали со статическими, т. е. с теми значениями, которые соответствуют состоянию равновесия данной системы (при $\omega = 0$), члены, содержащие ω^2 , в предыдущих уравнениях должны исчезать, т. е. должны быть выполнены условия

$$P_1 r_1 + P_2 r_2 - P_3 r_3 = 0$$

и

$$r_3 y_3 P_3 - r_2 y_2 P_2 - r_1 y_1 P_1 = 0.$$

Принимая во внимание, что

$$r_1 = x_1, r_2 = x_2 \text{ и } r_3 = -x_3,$$

где x_1, x_2, x_3 — абсциссы грузов M_1, M_2, M_3 , эти условия можно написать в виде

$$\sum m x = 0 \text{ и } \sum m x y = 0.$$

Но

$$\sum m x = M x_c \text{ и } \sum m x y = J_{xy},$$

где M — общая масса всех грузов,

x_c — абсцисса их центра тяжести и

J_{xy} — центробежный момент инерции.

Следовательно, чтобы кинетические реакции совпадали со статическими, должны быть выполнены условия $x_c = 0$ и $J_{xy} = 0$, т. е. центр тяжести вращающихся масс должен лежать на оси вращения и центробежный момент инерции J_{xy} этих масс должен равняться нулю. Если эти условия выполнены, то говорят, что вращающиеся массы динамически уравновешены.

ДИНАМИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА

Вращение твёрдого тела вокруг неподвижной оси. Пусть данное твёрдое тело имеет две неподвижно закреплённые точки.

Неподвижную прямую, проходящую через эти две точки, примем за ось z . Если к этому телу приложена произвольно заданная система сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \dots$ (фиг. 37), то тело будет вращаться вокруг неподвижной оси z .

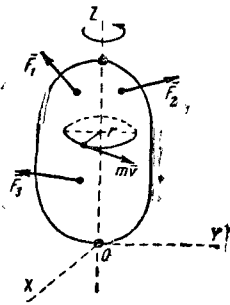
Обозначим угловую скорость тела через ω и найдём его кинетический момент (т. е. главный момент количеств движения материальных частиц тела) относительно оси вращения; принимая во внимание, что величина линейной скорости v всякой точки тела равна $r\omega$, где r — расстояние этой точки от оси z , и что вектор $m\vec{v}$ лежит в плоскости, перпендикулярной к оси z , будем иметь

$$G_z = \sum m \omega r^2 = \omega \sum m r^2 = \omega J_z,$$

или

$$G_z = J_z \omega,$$

где $J_z = \sum m r^2$ — момент инерции тела относительно оси z . Применяя теорему о кинетическом моменте системы относительно оси z , получим



Фиг. 37

$$J_z \frac{d\omega}{dt} = \Sigma mom_z (\bar{F});$$

так как $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$, где φ — угол (в радианах), определяющий положение вращающегося тела, то предыдущее уравнение принимает вид:

$$J_z \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \Sigma mom_z (\bar{F})$$

или

$$J_z \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M_z,$$

где

$$M_z = \Sigma mom_z (\bar{F}).$$

Это есть дифференциальное уравнение вращательного движения тела силы реакции закреплённых точек не входят, так как моменты этих сил относительно оси вращения равны нулю. Проинтегрировав это уравнение, находят угол φ , как функцию времени t , т. е. находят закон вращательного движения, которое получает тело под действием приложенных к нему сил.

В дифференциальное уравнение вращательного движения тела силы реакции закреплённых точек не входят, так как моменты этих сил относительно оси вращения равны нулю. Проинтегрировав это уравнение, находят угол φ , как функцию времени t , т. е. находят закон вращательного движения, которое получает тело под действием приложенных к нему сил.

Если $M_z = 0$, то

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} = 0$$

и, следовательно, $\omega = \text{const}$, т. е. тело вращается равномерно. Если

$$M_z = \text{const},$$

то

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_z}{J_z} = \text{const},$$

т. е. угловое ускорение ϵ является постоянным, и, следовательно, вращение тела в этом случае будет равномерно-переменным.

Работа силы \bar{F} , приложенной к вращающемуся твёрдому телу, при повороте тела на элементарный угол $d\varphi$ равна

$$\delta A = mom_z (\bar{F}) d\varphi,$$

а потому

$$\begin{aligned} \Sigma \delta A &= \Sigma mom_z (\bar{F}) d\varphi = \\ &= M_z \cdot d\varphi \text{ и } \Sigma A = \int_{\varphi_0}^{\varphi} M_z d\varphi. \end{aligned}$$

Так как кинетическая энергия вращающегося тела равна $J_z \frac{\omega^2}{2}$, то уравнение кинетической энергии для твёрдого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси z , принимает вид

$$\frac{1}{2} J_z (\omega^2 - \omega_0^2) = \int_{\varphi_0}^{\varphi} M_z \cdot d\varphi.$$

Мощностью N называется работа, произведённая в единицу времени, т. е.

$$N = \frac{dA}{dt}.$$

Мощность измеряется или в лошадиных силах или в ваттах, причём 1 л. с. = 75 кгм/сек и 1 вт = 102 кгм/сек.

В случае вращательного движения твёрдого тела

$$N = \frac{dA}{dt} = \frac{dA}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = M_z \cdot \omega,$$

или

$$N = M_z \frac{\pi n}{30} \text{ кгм/сек},$$

где n — число оборотов тела в минуту. Отсюда

$$N = \frac{\pi}{30 \cdot 75} n M_z \text{ л. с.}$$

и

$$M_z = \frac{30 \cdot 75}{\pi} \frac{N}{n} = 716,2 \frac{N}{n} \text{ кгм}.$$

Для определения реакций, возникающих в закреплённых точках вращающегося твёрдого тела, можно воспользоваться принципом Даламбера.

Если к каждой материальной частице вращающегося тела приложим касательную и нормальную силы инерции, то система заданных сил \bar{F}_k , сил реакции закреплённых точек и сил инерции будет удовлетворять шести уравнениям статики, выражающим условия равновесия сил, приложенных к твёрдому телу (три уравнения проекций на координатные оси и три уравнения моментов относительно этих осей). Возьмём начало координат O в одной из закреплённых точек; расстояние между этими точками обозначим через h , ось z направим по оси вращения тела; проекции искомых реакций на координатные оси обозначим через $R_x, R_y, R_z, R'_x, R'_y, R'_z$.

В уравнение моментов относительно оси z не войдут ни искомые реакции, ни центробежные силы, так как моменты всех этих сил относительно оси z равны нулю; это уравнение совпадает с дифференциальным уравнением вращательного движения тела. Из остальных пяти уравнений получают:

$$R'_x = -\frac{1}{h} [\Sigma mom_y (\bar{F}) + J_{zx}\omega^2 + J_{yz}\epsilon];$$

$$R'_y = \frac{1}{h} [\Sigma mom_x (\bar{F}) - J_{yz}\omega^2 + J_{zx}\epsilon];$$

$$\begin{aligned} R_x &= -\Sigma F_x - Mx_c\omega^2 - My_c\epsilon + \\ &+ \frac{1}{h} [\Sigma mom_y (\bar{F}) + J_{zx}\omega^2 + J_{yz}\epsilon]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_y &= -\Sigma F_y - My_c\omega^2 + Mx_c\epsilon - \\ &- \frac{1}{h} [\Sigma mom_x (\bar{F}) - J_{yz}\omega^2 + J_{zx}\epsilon]; \end{aligned}$$

$$R_z + R'_z = -\Sigma F_z.$$

В этих формулах M — масса данного тела, x_c и y_c — координаты его центра тяжести, а J_{yz} и J_{zx} обозначают центробежные моменты инерции тела, т. е.

$$J_{yz} = \Sigma m y z$$

и

$$J_{zx} = \Sigma m z x.$$

Из этих формул видно, что динамические реакции закреплённых точек будут совпадать со статическими (т. е. с реакциями, соответствующими тому случаю, когда тело под действием заданных сил \vec{F}_K находится в покое), если члены, содержащие ω^2 и ϵ , в этих формулах исчезают, т. е. если

$$x_c = y_c = 0 \text{ и } J_{yz} = J_{zx} = 0.$$

Если оси x, y, z , имеющие начало в какой-нибудь точке данного тела, выбраны так, что центробежные моменты инерции J_{yz}, J_{zx}, J_{xy} равны нулю, то такие оси называются главными осями инерции тела в данной точке.

Главные оси инерции, имеющие начало в центре тяжести тела, называются главными центральными осями инерции. Поэтому приходим к заключению:

для того чтобы при вращении твёрдого тела вокруг неподвижной оси динамические реакции закреплённых точек совпадали со статическими, необходимо и достаточно, чтобы ось вращения тела являлась одной из главных центральных осей инерции этого тела. Если это условие выполнено, то говорят, что вращающееся тело динамически уравновешено.

Физический маятник. Физическим (или сложным) маятником называется твёрдое тело, которое может вращаться вокруг неподвижной горизонтальной оси под действием только силы тяжести. Если обозначить угол отклонения маятника от положения равновесия (отсчитываемый в направлении, противоположном движению часовой стрелки) через φ , расстояние центра тяжести C маятника от оси вращения O , (перпендикулярной к плоскости чертежа) — через s и вес маятника — через P (фиг. 38), то момент силы \vec{P} относительно оси вращения равен

$$-Ps \cdot \sin \varphi = -Mgs \cdot \sin \varphi,$$

где M — масса маятника; дифференциальное уравнение движения маятника имеет вид

$$J_0 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -Mgs \cdot \sin \varphi,$$

где J_0 — момент инерции маятника относительно оси вращения. Но

$$J_0 = J_c + Ms^2 = Mi_c^2 + Ms^2 = M(i_c^2 + s^2).$$

Здесь J_c — момент инерции маятника относительно оси, параллельной оси вращения и проходящей через центр тяжести C (см. «Моменты инерции», стр. 393), а i_c — радиус инерции относительно той же оси, а потому

дифференциальное уравнение движения маятника принимает вид

$$(i_c^2 + s^2) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -gs \cdot \sin \varphi.$$

При малых колебаниях маятника можно принять $\sin \varphi \approx \varphi$.

Тогда получим дифференциальное уравнение малых колебаний маятника

$$(i_c^2 + s^2) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -gs \varphi,$$

или

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + k^2 \varphi = 0,$$

где

$$k^2 = \frac{gs}{i_c^2 + s^2}.$$

Это есть дифференциальное уравнение гармонических колебаний (см. «Динамика материальной точки», стр. 377).

Интегрируя это уравнение в предположении, что начальный угол отклонения маятника равен φ_0 , а его начальная угловая скорость равна нулю, получим

$$\varphi = \varphi_0 \cos(kt).$$

Период малых колебаний маятника

$$T = \frac{2\pi}{k} = 2\pi \sqrt{\frac{i_c^2 + s^2}{sg}}.$$

Эта формула является достаточно точной при $\varphi_0 \leq 20^\circ$; в этом случае ошибка не превышает 0,8%. При больших значениях угла φ_0 можно пользоваться более точной формулой:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{i_c^2 + s^2}{sg}} \left(1 + \frac{\varphi_0^2}{16}\right).$$

Период малых колебаний простого или математического маятника (т. е. материальной точки, подвешенной на нити длиной l) определяется по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Из сравнения этой формулы с вышеуказанной следует, что период малых колебаний физического маятника равен периоду колебаний математического маятника, длина которого

$$l = \frac{i_c^2 + s^2}{s} = s + \frac{i_c^2}{s}.$$

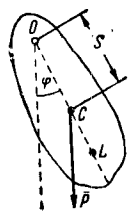
Эта длина называется приведённой длиной физического маятника. Если на прямой OC отложить от точки O отрезок

$$OL = l = s + \frac{i_c^2}{s},$$

то точка L называется центром качаний физического маятника.

УДАР

Основные положения. Явление удара характерно тем, что скорость тела, подвергнувшегося удару, а следовательно, и его ко-

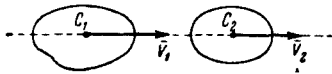


Фиг. 38

личество движения за очень короткий промежуток времени изменяются на конечную величину. Такое почти мгновенное конечное изменение количества движения тела происходит потому, что развивающаяся при ударе сила достигает весьма большой величины, так что её импульс, несмотря на то, что сила действует на тело в течение весьма малого времени, имеет конечную величину. Такая сила называется ударной силой, а её импульс называется ударным импульсом. Ударный импульс определяется (по величине и направлению) изменением количества движения тела, т. е.

$$\vec{S}^{(y\delta)} = m\vec{v}_c - m\vec{v}_c,$$

где m — масса тела, а \vec{v}_c и \vec{v}_c — скорости центра тяжести тела в начале и в конце удара.



Фиг. 39

При разделении величины $S^{(y\delta)}$ на время τ действия ударной силы получают среднюю величину этой силы. Так как импульс неударной силы (например, силы тяжести) за время τ весьма мал по сравнению с $S^{(y\delta)}$, то эффектом действия неударных сил при явлении удара обычно можно пренебречь.

Прямой центральный удар двух тел. Пусть два тела, массы которых равны m_1 и m_2 , движутся прямолинейно и поступательно со скоростями \vec{v}_1 и \vec{v}_2 (фиг. 39). Если эти тела сталкиваются, то наблюдают явление удара. В течение весьма малого промежутка времени τ сек. тела будут касаться друг друга в некоторой точке и будут давить друг на друга. Сила этого давления является ударной силой. Общая нормаль к поверхностям этих тел в точке их касания называется линией удара. Если скорости \vec{v}_1 и \vec{v}_2 направлены по линии удара, то в этом случае удар называется прямым; если линия удара проходит через центры тяжести C_1 и C_2 обоих тел, то удар называется центральным. На фиг. 39 изображён случай прямого центрального удара двух тел. Если обозначим скорости тел после удара через \vec{u}_1 и \vec{u}_2 , то в случае прямого центрального удара эти скорости будут направлены по линии удара. Величины этих скоростей определяются по формулам:

$$u_1 = v_1 - (1+k) \frac{m_2}{m_1+m_2} (v_1 - v_2);$$

$$u_2 = v_2 - (1+k) \frac{m_1}{m_1+m_2} (v_2 - v_1),$$

где k — так называемый коэффициент восстановления, причём

$$k = - \frac{u_1 - u_2}{v_1 - v_2},$$

т. е. коэффициент восстановления равен отношению относительных скоростей тел

после и до удара, взятому с обратным знаком.

В этих формулах скорости тел берутся в алгебраическом значении, т. е. со знаком плюс или минус, в зависимости от того, в какую сторону по линии удара направлена скорость тела.

Величина коэффициента восстановления (безразмерное число) зависит от материала ударяющихся тел и определяется из опыта. Полученные из опыта значения коэффициента k для некоторых тел указаны в табл. 1.

Если $k=0$, то

удар называется неупругим; если $k=1$, то удар называется вполне или совершенно упругим. Хотя для реальных физических тел k всегда есть некоторая правильная поло-

Таблица 1

| Ударяющиеся тела | k |
|------------------------|------|
| Дерево о гуттаперчу | 0,26 |
| Деревянные шары | 0,50 |
| Стальные шары | 0,56 |
| Стеклянные шары | 0,94 |
| Шары из слоновой кости | 0,89 |

жительная дробь, но в некоторых случаях, когда k невелико или близко к единице, можно без существенной погрешности рассматривать удар как неупругий или как вполне упругий.

При $k=0$ из предыдущих формул находят

$$u_1 = u_2 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

В этом случае тела после удара не отделяются друг от друга, а движутся вместе с одинаковой скоростью.

Если $k=1$, то

$$u_1 = v_1 - \frac{2m_2}{m_1+m_2} (v_1 - v_2);$$

$$u_2 = v_2 - \frac{2m_1}{m_1+m_2} (v_2 - v_1).$$

В случае прямого центрального удара тела о неподвижную поверхность нужно, очевидно, положить $v_2 = u_2 = 0$, тогда

$$k = - \frac{u_1}{v_1} \text{ и } u_1 = -k v_1;$$

знак минус указывает на то, что скорость тела после удара направлена противоположно его скорости до удара (тело, ударившись о неподвижную поверхность, отскакивает от неё в противоположном направлении).

Величина ударного импульса определяется по изменению количества движения одного из ударившихся тел, т. е.

$$\begin{aligned} S^{(y\delta)} &= m_2 u_2 - m_2 v_2 = m_2 (u_2 - v_2) = \\ &= (1+k) \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2). \end{aligned}$$

Полагая здесь $k=0$ или $k=1$, можно получить величину ударного импульса при неупругом и при вполне упругом ударе.

При ударе двух тел происходит потеря кинетической энергии, т. е. общая кинетическая энергия T обоих тел после удара будет меньше их кинетической энергии T_0 в начале удара. Потерянная кинетическая

энергия переходит в тепловую энергию; известно, что при ударе тела нагреваются. Величина потерянной при ударе кинетической энергии определяется по формуле

$$T_0 - T = (1 - k^2) \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (v_1 - v_2)^2$$

или по формуле

$$T_0 - T = \frac{1 - k}{1 + k} \left[\frac{m_1 (v_1 - u_1)^2}{2} + \frac{m_2 (v_2 - u_2)^2}{2} \right].$$

Если $k = 0$, то из последней формулы получаем

$$T_0 - T = \frac{m_1 (v_1 - u_1)^2}{2} + \frac{m_2 (v_2 - u_2)^2}{2},$$

т. е. при неупругом ударе двух тел потерянная кинетическая энергия равна кинетической энергии этих тел, соответствующей их потерянными скоростям (теорема Карно).

Если $k = 1$, то $T_0 - T = 0$ и $T = T_0$, т. е. при вполне упругом ударе кинетическая энергия не теряется.

Рассмотрим случай, когда $k = 0$ и $v_2 = 0$, т. е. случай неупругого удара, при котором одно из ударяющихся тел до удара неподвижно. В этом случае:

$$\begin{aligned} u_1 = u_2 &= \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}; \\ T_0 &= \frac{m_1 v_1^2}{2}; \quad T = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2} = \\ &= \frac{m_1^2 v_1^2}{2(m_1 + m_2)} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} T_0 = \frac{1}{1 + \frac{m_2}{m_1}} T_0. \end{aligned}$$

Если масса m_1 значительно больше массы m_2 , то дробь $\frac{m_2}{m_1}$ будет мала, и величина T будет близка к T_0 , т. е. потеря кинетической энергии будет невелика; такой случай имеет место, например, при забивке свай или при вбивании гвоздя молотком. Когда неподвижному телу (например, свае) нужно сообщить посредством удара значительную скорость, масса этого тела должна быть значительно меньше массы ударяющего тела.

Если, наоборот, масса m_2 значительно больше массы m_1 , то дробь $\frac{m_2}{m_1}$ будет велика, а потому величина T будет составлять небольшую часть от T_0 (если, например, $\frac{m_2}{m_1} = 10$, то величина T составляет 9% от T_0); следовательно, значительная часть начальной кинетической энергии при ударе теряется; такой случай имеет место, например, при ковке или штамповке металла.

Пример 1. Вес парового молота $P_1 = 1$ т, общий вес ковочки и наковальни $P_2 = 15$ т. Коэффициент восстановления $k = 0,6$. Найти к.п.д. молота.

Пусть скорость молота в начале удара равна v_1 . Так как ковочка и наковальня до удара неподвижны, то $v_2 = 0$, а поэтому

$$T_0 = \frac{m_1 v_1^2}{2},$$

где m_1 — масса молота. Потерянную при ударе кинетическую энергию определяем по первой из указанных выше формул

$$T_0 - T = (1 - k^2) \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} v_1^2.$$

Эта энергия затрачивается на работу деформации ковочки, которая является в данном случае полезной работой, а потому искомый к. п. д. будет

$$\eta = \frac{T_0 - T}{T_0} = (1 - k^2) \frac{m_2}{m_1 + m_2},$$

но

$$m_1 = \frac{P_1}{g} \quad \text{и} \quad m_2 = \frac{P_2}{g},$$

а потому

$$\eta = 0,64 \frac{P_2}{P_1 + P_2} = 0,64 \frac{15}{16} = 0,6.$$

Пример 2. При забивке свай боек копра весом $P_1 = 450$ кг падает без начальной скорости с высоты $h = 2$ м. Вследствие полученного удара свая весом $P_2 = 50$ кг углубляется в грунт на расстояние $S = 1$ см. Найти среднюю величину силы сопротивления грунта и к. п. д. копра, считая удар неупругим. В начале удара скорость бойка равна

$$v_1 = \sqrt{2gh},$$

а скорость сваи

$$v_2 = 0.$$

Так как удар считаем неупругим, то общая скорость этих тел после удара равна

$$u = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}.$$

Кинетическая энергия после удара равна

$$\begin{aligned} T &= (m_1 + m_2) \frac{u^2}{2} = \frac{m_1^2 v_1^2}{2(m_1 + m_2)} = \\ &= \frac{P_1^2 v_1^2}{2g(P_1 + P_2)} = \frac{P_1^2 h}{P_1 + P_2}. \end{aligned}$$

Обозначая среднюю величину силы сопротивления грунта через R и применяя теорему кинетической энергии к движению сваи после удара, получим

$$\frac{P_1^2 h}{P_1 + P_2} + (P_1 + P_2) S = RS,$$

откуда

$$\begin{aligned} R &= P_1 + P_2 + \frac{P_1^2 h}{S(P_1 + P_2)} = 500 + \\ &+ \frac{450^2 \cdot 2 \cdot 100}{500} = 81\,500 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Кинетическая энергия в начале удара равна

$$T_0 = \frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{P_1}{g} v_1^2 = P_1 h.$$

Оставшаяся после удара кинетическая энергия T расходуется на работу вбивания сваи, которая является в данном случае полезной работой; поэтому искомый к. п. д. равен

$$\eta = \frac{T}{T_0} = \frac{P_1}{P_1 + P_2} = \frac{450}{500} = 0,9.$$

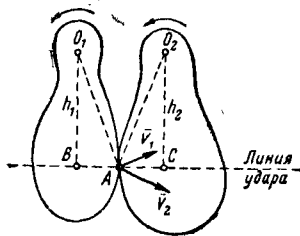
Пример 3. Железнодорожный вагон весом $P_1 = 25$ т, движущийся со скоростью $v_1 = 12$ км/час, нагоняет другой вагон весом $P_2 = 20$ т, имеющий скорость $v_2 = 8$ км/час. Найти скорости этих вагонов после столкновения, если удар в буферах можно считать вполне упругим.

Так как $k = 1$, то искомые скорости находят по формулам:

$$\begin{aligned} u_1 &= v_1 - \frac{2m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2) = \\ &= v_1 - \frac{2P_2}{P_1 + P_2} (v_1 - v_2) = 12 - \frac{40}{45} \cdot 4 = 8,44 \text{ км/час}; \end{aligned}$$

$$u_2 = v_2 - \frac{2m_1}{m_1 + m_2} (v_2 - v_1) = \\ = v_2 - \frac{2P_1}{P_1 + P_2} (v_2 - v_1) = 8 + \frac{50}{45} \cdot 4 = 12,44 \text{ км/час.}$$

Удар двух тел, вращающихся вокруг неподвижных параллельных осей. Пусть два тела вращаются вокруг осей (перпендикулярных к плоскости чертежа) O_1 и O_2 с угловыми скоростями ω_{01} и ω_{02} (фиг. 40). Пусть в некоторый момент эти тела сталкиваются, причём соприкосновение тел во время удара происходит в некоторой точке A ; общая нормаль к поверхностям этих тел в точке A является линией удара. В этом случае применимы те же формулы, как и в случае прямого центрального удара двух тел; только в этих формулах скорости v_1 , v_2 , u_1 и u_2 нужно заменить нормальными



Фиг. 40

составляющими (т. е. составляющими в направлении линии удара) v_{1n} , v_{2n} , u_{1n} и u_{2n} скоростей тех точек данных тел, которые совпадают с точкой A , а массы m_1 и m_2 следует заменить через m'_1 и m'_2 , причём

$$m'_1 = \frac{J_1}{h_1^2} \text{ и } m'_2 = \frac{J_2}{h_2^2},$$

где J_1 и J_2 — моменты инерции данных тел относительно осей вращения O_1 и O_2 , а h_1 и h_2 — расстояния линии удара от O_1 и O_2 . Эти величины m'_1 и m'_2 называются массами данных тел, приведенными к точкам B и C , т. е. к основаниям перпендикуляров h_1 и h_2 .

Следовательно,

$$u_{1n} = v_{1n} - (1 + k) \frac{m'_2}{m'_1 + m'_2} (v_{1n} - v_{2n});$$

$$u_{2n} = v_{2n} - (1 + k) \frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} (v_{2n} - v_{1n}).$$

Так как

$$v_{1n} = h_1 \omega_{01}, v_{2n} = h_2 \omega_{02}, u_{1n} = h_1 \omega_1 \text{ и } u_{2n} = h_2 \omega_2,$$

то получаем формулы для угловых скоростей ω_1 и ω_2 вращающихся тел после удара:

$$\omega_1 = \omega_{01} - (1 + k) \frac{m'_2}{m'_1 + m'_2} \left(\omega_{01} - \frac{h_2}{h_1} \omega_{02} \right);$$

$$\omega_2 = \omega_{02} - (1 + k) \frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \left(\omega_{02} - \frac{h_1}{h_2} \omega_{01} \right).$$

По тем же формулам, какие были даны для случая прямого центрального удара двух тел, делая в них указанную выше замену,

можно найти величину ударного импульса и величину потерянной кинетической энергии.

Действие ударной силы на твёрдое тело, вращающееся вокруг неподвижной оси. Центр удара. Пусть твёрдое тело вращается вокруг неподвижной оси z с угловой скоростью ω_0 и пусть на это тело действует в течение весьма малого промежутка времени τ сек. ударная сила \bar{F} , приложенная к телу в некоторой точке (x, y, z) . Ударный импульс, приложенный к телу, будет равен:

$$\bar{S}^{(y\delta)} = \int_0^\tau \bar{F} dt,$$

а его проекции на координатные оси равны:

$$S_x^{(y\delta)} = \int_0^\tau X dt; S_y^{(y\delta)} = \int_0^\tau Y dt;$$

$$S_z^{(y\delta)} = \int_0^\tau Z dt,$$

где X , Y , Z — проекции на оси ударной силы \bar{F} .

Дифференциальное уравнение вращательного движения тела имеет вид

$$J_z \frac{d\omega}{dt} = mom_z(\bar{F}) = xY - yX,$$

где J_z — момент инерции тела относительно оси вращения.

Отсюда, интегрируя, находим:

$$J_z (\omega - \omega_0) = \int_0^\tau xY dt - \int_0^\tau yX dt.$$

Так как перемещения точек тела за время τ сек. весьма малы, то ими можно пренебречь, и, следовательно, координаты x и y точки приложения ударной силы в течение этого времени можно считать постоянными, а потому

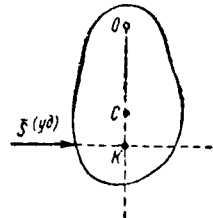
$$J_z (\omega - \omega_0) = x \int_0^\tau Y dt - y \int_0^\tau X dt = \\ = xS_y^{(y\delta)} - yS_x^{(y\delta)} = mom_z(\bar{S}^{(y\delta)}),$$

откуда

$$\omega - \omega_0 = \frac{mom_z(\bar{S}^{(y\delta)})}{J_z},$$

т. е. изменение угловой скорости тела под действием приложенного к нему ударного импульса равно моменту этого импульса относительно оси вращения, разделённому на момент инерции тела относительно той же оси.

Пусть данное тело вращается вокруг неподвижной оси O , перпендикулярной к плоскости чертежа (фиг. 41), и пусть эта плоскость является для тела плоскостью симметрии. Предполагается, кроме того, что подшипники, поддерживающие ось, на которой закреплено данное вращающееся тело, расположены симметрично относительно точки O .



Фиг. 41

Если к этому телу приложен ударный импульс $\vec{J}^{(0)}$, то для технической практики весьма важным является вопрос: при каких условиях действие этого импульса не будет передаваться на подшипники, т. е. подшипники не будут испытывать удара? В рассматриваемом случае симметричного тела для осуществления этого требования должны быть выполнены следующие условия: 1) ударный импульс должен лежать в плоскости симметрии тела; 2) направление этого импульса должно быть перпендикулярно к прямой OC , т. е. к прямой, соединяющей центр тяжести тела C с точкой O пересечения оси вращения с плоскостью симметрии тела; 3) расстояние линии удара (линии действия ударного импульса) от оси вращения тела должно равняться $\frac{J_0}{Ms}$, где J_0 — мо-

мент инерции тела относительно оси вращения; M — масса тела; s — расстояние центра тяжести тела от оси вращения, т. е. $s = OC$. Точка K , лежащая на прямой OC

на расстоянии от O , равном $OK = \frac{J_0}{Ms}$, называется центром удара. Следовательно, чтобы подшипники не испытывали удара, линия действия ударного импульса должна проходить через центр удара. Так как $J_0 = J_c + Ms^2$, где J_c — момент инерции тела относительно оси, проходящей через его центр тяжести и параллельной оси вращения O , то

$$OK = s + \frac{J_c}{Ms}.$$

Отсюда следует, что $OK > OC$.

ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ И МОМЕНТЫ ИНЕРЦИИ

ОБЩИЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ КООРДИНАТ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ

Всякая система параллельных сил, приводящаяся к одной равнодействующей силе, имеет свой центр, т. е. точку, через которую всегда проходит эта равнодействующая независимо от того, какое направление будем давать этим параллельным силам, при условии, что их величина и точки приложения остаются неизменными. *Центр параллельных сил, представляющих собой веса материальных частиц данного тела, называется центром тяжести этого тела.*

Для нахождения центра тяжести данное тело делят на такие части конечных размеров, чтобы положение их центров тяжести было известно, или же на части бесконечно малые. В зависимости от этого координаты центра тяжести выражаются через конечные суммы или через интегралы.

Если тело имеет плоскость, ось или центр симметрии, то его центр тяжести лежит соответственно в этой плоскости, на этой оси или в этом центре симметрии.

В общем случае координаты центра тяжести C определяются по формулам:

$$x_c = \frac{\int x \rho dV}{M}; y_c = \frac{\int y \rho dV}{M}; z_c = \frac{\int z \rho dV}{M},$$

где M — масса тела; ρ — плотность в данной точке тела; dV — элемент объема и x, y, z — координаты этого элемента; интегралы распространяются на весь объем V данного тела. Если тело однородно, то плотность имеет одно и то же значение во всех точках тела, т. е. $\rho = \text{const}$. В этом случае $M = \rho V$, а потому (по сокращении на ρ)

$$x_c = \frac{\int x dV}{V}; y_c = \frac{\int y dV}{V}; z_c = \frac{\int z dV}{V}.$$

В случае тела двух измерений (например, плоской тонкой пластинки, толщиной которой можно пренебречь)

$$x_c = \frac{\int x \rho dS}{M}; y_c = \frac{\int y \rho dS}{M},$$

где dS — элемент площади, а ρ попрежнему обозначает плотность, т. е. в этом случае величину массы, приходящейся на единицу площади; интегралы распространяются на всю площадь S пластинки. Если $\rho = \text{const}$, то

$$x_c = \frac{\int x dS}{S}; y_c = \frac{\int y dS}{S}.$$

Эти формулы определяют координаты центра тяжести плоской геометрической фигуры (или центра тяжести площади). Интегралы, стоящие в числителе этих формул, выражают так называемые статические моменты данной плоской фигуры относительно координатных осей Oy и Ox . Точно так же интегралы $\int x dV$ и два аналогичных выражают статические моменты геометрического тела относительно координатных плоскостей YOz , zOx и xOy .

В случае тела одного измерения, т. е. так называемой материальной линии (например, тонкого стержня или куска тонкой проволоки, поперечными размерами которых в сравнении с длиной можно пренебречь), имеем:

$$x_c = \frac{\int x \rho dl}{M}; y_c = \frac{\int y \rho dl}{M}; z_c = \frac{\int z \rho dl}{M},$$

где dl — элементарная дуга данной линии; M — масса этой линии, а ρ обозначает линейную плотность, т. е. величину массы, приходящейся на единицу длины. Интегралы берутся вдоль всей данной линии.

Если $\rho = \text{const}$ (для однородной линии), то

$$x_c = \frac{1}{l} \int x dl; y_c = \frac{1}{l} \int y dl;$$

$$z_c = \frac{1}{l} \int z dl,$$

где l — есть длина данной линии.

Для однородных поверхностей и тел вращения положение центра тяжести, лежащего на оси вращения, определяется следующим образом: пусть ось x есть ось вращения и пусть уравнение меридиональной кривой имеет вид

$$y = f(x).$$

Тогда:
для поверхности вращения

$$x_c = \frac{2\pi}{S} \int_{x_1}^{x_2} xy \, dl,$$

где

$$S = 2\pi \int_{x_1}^{x_2} y \, dl \text{ и } dl = \sqrt{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx;$$

для тела вращения

$$x_c = \frac{\pi}{V} \int_{x_1}^{x_2} xy^2 dx,$$

где

$$V = \pi \int_{x_1}^{x_2} y^2 dx.$$

ПОЛОЖЕНИЕ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ НЕКОТОРЫХ ОДНОРОДНЫХ ЛИНИЙ, ФИГУР И ТЕЛ

Прямолинейный отрезок. Центр тяжести находится на середине отрезка.

Периметр треугольника. Центр тяжести находится в центре круга, вписанного в треугольник, вершины которого лежат в серединах сторон данного треугольника. Расстояние центра тяжести от стороны треугольника a равно

$$d_a = \frac{h_a}{2} \cdot \frac{b+c}{a+b+c},$$

где a, b, c — стороны данного треугольника и h_a — высота, соответствующая стороне a .

Периметр параллелограмма. Центр тяжести находится в точке пересечения диагоналей.

Дуга круга радиуса R . Центр тяжести находится на прямой, делящей пополам центральный угол дуги, на расстоянии от центра дуги, равном

$$x_c = \frac{R \sin \alpha}{\alpha},$$

где α — половина центрального угла дуги в радианах.

При $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (половина окружности)

$$x_c = 0,6366 R.$$

При $\alpha = \frac{\pi}{4}$ (четверть окружности)

$$x_c = 0,9003 R.$$

При $\alpha = \frac{\pi}{6}$ (шестая часть окружности)

$$x_c = 0,9549 R.$$

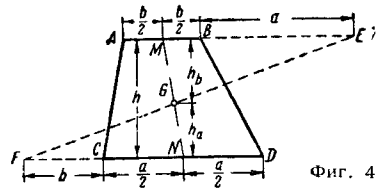
Треугольник. Центр тяжести находится в точке пересечения медиан:

$$x_c = \frac{1}{3} (x_1 + x_2 + x_3);$$

$$y_c = \frac{1}{3} (y_1 + y_2 + y_3);$$

$$z_c = \frac{1}{3} (z_1 + z_2 + z_3),$$

где $x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; x_3, y_3, z_3$ — координаты вершин треугольника.



Параллелограмм. Центр тяжести находится на пересечении диагоналей.

Трапеция. Центр тяжести G находится в точке пересечения прямой EF с прямой, соединяющей середины M и N параллельных сторон AB и CD (фиг. 42). Расстояния h_a и h_b центра тяжести от этих сторон равны:

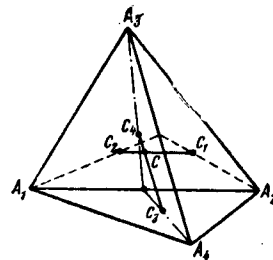
$$h_a = \frac{h}{3} \cdot \frac{a+2b}{a+b}; \quad h_b = \frac{h}{3} \cdot \frac{2a+b}{a+b},$$

где h — высота трапеции.

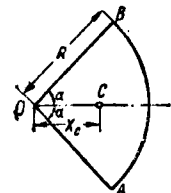
Четырёхугольник. Для нахождения центра тяжести разбивают данный четырёхугольник $A_1 A_2 A_3 A_4$ одной диагональю на два треугольника с центрами тяжести C_1 и C_2 (фиг. 43) и другой диагональю на два треугольника с центрами тяжести C_3 и C_4 .

Точка пересечения прямых $C_1 C_2$ и $C_3 C_4$ есть искомый центр тяжести C данного четырёхугольника.

Правильный многоугольник. Центр тяжести находится в центре вписанного или описанного круга.



Фиг. 43



Фиг. 44

Круговой сектор (фиг. 44). Центр тяжести лежит на оси симметрии, причём

$$x_c = \frac{2R \sin \alpha}{3\alpha}.$$

При $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (площадь полукруга)

$$x_c = 0,4244 R.$$

При $\alpha = \frac{\pi}{4}$ (площадь четверти круга)

$$x_c = 0,6002 R.$$

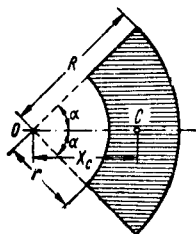
При $\alpha = \frac{\pi}{6}$ (площадь шестой части круга)

$$x_c = 0,6366 R.$$

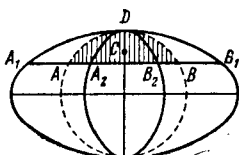
Круговой сегмент. Центр тяжести лежит на оси симметрии, причём

$$x_c = \frac{4}{3} \cdot \frac{R \sin^3 \alpha}{2\alpha - \sin 2\alpha},$$

где x_c — расстояние ц. т. от центра O дуги сегмента и α — половина центрального угла этой дуги в радианах.



Фиг. 45



Фиг. 46

Часть плоского круглого кольца (фиг. 45). Центр тяжести лежит на оси симметрии, причём

$$x_c = \frac{2}{3} \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha}.$$

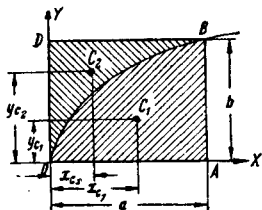
Эллиптический сегмент (фиг. 46). Центры тяжести симметричных сегментов A_1B_1D и A_2B_2D совпадают с центром тяжести кругового сегмента ABD , отсекаемого хордой эллипса от круга, диаметр которого равен оси эллипса, перпендикулярной к этой хорде.

Половина параболического сегмента (фиг. 47)

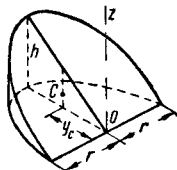
$$x_{c1} = \frac{3}{5} a; y_{c1} = \frac{3}{8} b \text{ для фигуры } OAB;$$

$$x_{c2} = \frac{3}{10} a; y_{c2} = \frac{3}{4} b \text{ для фигуры } ODB.$$

Поверхность шарового пояса. Центр тяжести находится в середине высоты.



Фиг. 47



Фиг. 48

Боковая поверхность правильной пирамиды или круглого конуса. Центр тяжести находится на прямой, соединяющей вершину с центром тяжести основания, на расстоянии одной трети высоты (пирамиды или конуса) от основания.

Боковая поверхность круглого усечённого конуса. Если радиусы верхнего и нижнего оснований равны r и R , а высота равна h , то центр тяжести лежит на прямой, соеди-

няющей центры оснований, на расстоянии от большего основания, равном

$$z_c = \frac{h}{3} \cdot \frac{R + 2r}{R + r}.$$

Призма или цилиндр с параллельными основаниями. Центр тяжести находится в середине прямолинейного отрезка, соединяющего центры тяжести оснований.

Цилиндрическая подкова (непараллельно усечённый круглый полуцилиндр) (фиг. 48). Центр тяжести лежит в плоскости симметрии, причём

$$y_c = \frac{3}{16} \pi r;$$

$$z_c = \frac{3}{32} \pi h.$$

Пирамида или конус. Центр тяжести находится на отрезке, соединяющем вершину с центром тяжести основания, на расстоянии $\frac{3}{4}$ этого отрезка от вершины.

Параллельно усечённые пирамида или конус. Центр тяжести лежит на отрезке, соединяющем центры тяжести оснований; расстояние центра тяжести от нижнего основания равно

$$z_c = \frac{h}{4} \frac{S_1 + 2\sqrt{S_1 S_2} + 3S_2}{S_1 + \sqrt{S_1 S_2} + S_2},$$

где S_1 и S_2 — площади нижнего и верхнего оснований и h — высота.

Шаровой сегмент. Расстояние центра тяжести, лежащего на оси симметрии, от основания сегмента равно

$$z_c = \frac{3}{4} \frac{(2r - h)^2}{3r - h},$$

где h — высота сегмента и r — его радиус.

Шаровой сектор. Расстояние центра тяжести, лежащего на оси симметрии, от центра шара равно

$$z_c = \frac{3}{8} (2r - h),$$

где r — радиус шарового сектора и h — высота шарового сегмента.

Параболоид вращения. Расстояние центра тяжести, лежащего на оси вращения, от основания парабоида равно

$$h_c = \frac{1}{3} h,$$

где h — высота парабоида.

Октант трёхосного эллипсоида. Если оси координат совпадают с осями эллипсоида, то

$$x_c = \frac{3}{8} a; y_c = \frac{3}{8} b; z_c = \frac{3}{8} c,$$

где a , b , c — полуоси эллипсоида.

МОМЕНТЫ ИНЕРЦИИ

Полярным моментом инерции J_0 тела относительно точки (полюса) O называется сумма произведений из массы dm каждой элементарной частицы тела на квадрат расстояния r этой частицы от точки O , т. е.

$$J_0 = \int_{(v)} r^2 dm = \int_{(v)} r^2 \rho dv,$$

где ρ — плотность в данной точке тела.

Интеграл распространяется на весь объём v данного тела. Если O есть начало координат, то

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2 \text{ и}$$

$$J_0 = \int_{(v)} \rho (x^2 + y^2 + z^2) dv.$$

Аналогично для момента инерции материальной плоской фигуры относительно точки O , лежащей в плоскости этой фигуры, имеем

$$J_0 = \int_{(s)} r^2 dm = \int_{(s)} r^2 \rho ds.$$

Интеграл распространяется на всю площадь S фигуры.

Осевым моментом инерции J_l тела относительно данной оси l называется сумма произведений из массы dm каждой частицы тела на квадрат расстояния h этой частицы от оси l , т. е.

$$J_l = \int_{(v)} h^2 dm = \int_{(v)} h^2 \rho dv.$$

Аналогично для момента инерции материальной плоской фигуры относительно оси l , лежащей в плоскости этой фигуры, имеем

$$J_l = \int_{(s)} h^2 dm = \int_{(s)} h^2 \rho ds.$$

Для однородных тел $\rho = \text{const}$, а потому множитель ρ можно вынести за интеграл, и задача сводится к вычислению интегралов:

$$\int_{(v)} r^2 dv; \int_{(v)} h^2 dv; \int_{(s)} r^2 ds; \int_{(s)} h^2 ds,$$

выражающих моменты инерции не физических, а геометрических тел или плоских фигур.

Моменты инерции тела относительно координатных осей x , y , z определяются по формулам:

$$J_x = \int_{(v)} \rho (y^2 + z^2) dv;$$

$$J_y = \int_{(v)} \rho (z^2 + x^2) dv; \quad J_z = \int_{(v)} \rho (x^2 + y^2) dv.$$

Для моментов инерции плоской фигуры относительно осей x и y , лежащих в плоскости этой фигуры,

$$J_x = \int_{(s)} \rho y^2 ds; \quad J_y = \int_{(s)} \rho x^2 ds.$$

Между моментами инерции тела относительно начала координат O и относительно трёх координатных осей существует очевидная зависимость

$$J_0 = \frac{1}{2} (J_x + J_y + J_z).$$

В случае плоской фигуры $J_0 = J_z$ (ось z направлена перпендикулярно к плоскости фигуры), а потому предыдущая зависимость переходит в $J_0 = J_x + J_y$.

Между моментами инерции тела относительно двух параллельных осей l и l' , из которых первая проходит через центр

тяжести C тела и расстояние между которыми равно d , существует зависимость

$$J_{l'} = J_l + Md^2,$$

где M — масса данного тела.

Такая же зависимость имеет место между полярными моментами инерции тела относительно центра тяжести C и относительно любой точки O , т. е.

$$J_0 = J_c + Md^2,$$

где $d = OC$. Пусть данное тело разделено на две части, массы которых равны m_1 и m_2 . Обозначив центры тяжести этих частей через C_1 и C_2 , а центр тяжести данного тела через C , проведём три параллельные оси через точки C_1 , C_2 и C . Пусть момент инерции данного тела относительно оси, проходящей через C , равен J , а моменты инерции его частей относительно осей, проходящих через C_1 и C_2 , равны J_1 и J_2 . Тогда

$$J = J_1 + J_2 + \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} d^2,$$

где d — расстояние между параллельными осями, проходящими через C_1 и C_2 .

Если момент инерции J_0 тела относительно точки O представить в виде $J_0 = Mi_0^2$, то величина i_0 называется радиусом инерции тела относительно точки O . Следовательно, $i_0 = \sqrt{\frac{J_0}{M}}$. Радиус инерции есть,

очевидно, расстояние от O такой точки, в которой нужно сосредоточить всю массу данного тела, чтобы момент инерции этой сосредоточенной массы (материальной точки) был равен J_0 . Аналогично, если $J_l = Mi_l^2$, то i_l называется радиусом инерции тела относительно оси l ; следовательно, $i_l = \sqrt{\frac{J_l}{M}}$.

Центробежным моментом инерции тела относительно двух координатных плоскостей yOz и zOx называется сумма произведений из массы dm каждой частицы тела на координаты x и y этой частицы, т. е.

$$J_{xy} = \int_{(v)} xy dm = \int_{(v)} \rho xy dv$$

и аналогично

$$J_{yz} = \int_{(v)} yz dm = \int_{(v)} \rho yz dv,$$

$$J_{zx} = \int_{(v)} zx dm = \int_{(v)} \rho zx dv.$$

В случае плоской материальной фигуры центробежный момент инерции относительно двух координатных осей x и y , лежащих в плоскости этой фигуры, равен

$$J_{xy} = \int_{(s)} xy dm = \int_{(s)} \rho xy ds.$$

Если $\rho = \text{const}$, то $J_{xy} = \rho \int_{(v)} xy dv$ и (для плоской фигуры) $J_{xy} = \rho \int_{(s)} xy ds$; интегралы в правых частях этих равенств выражают центробежные моменты инерции геометри-

ческого тела и геометрической плоской фигуры.

Если обозначить координаты центра тяжести данного тела через x_c, y_c, z_c и провести через этот центр систему осей x', y', z' , параллельных данным осям x, y, z , то

$$J_{xy} = J_{x'y'} + Mx_c y_c; \quad J_{yz} = J_{y'z'} + M y_c z_c; \quad J_{zx} = J_{z'x'} + M z_c x_c,$$

где M — масса данного тела.

Осевой момент инерции тела J относительно какой-нибудь оси, проходящей через начало прямоугольной системы координат и образующей с координатными осями углы α, β, γ , определяется по формуле

$$J = J_x \cos^2 \alpha + J_y \cos^2 \beta + J_z \cos^2 \gamma - 2 J_{xy} \cos \alpha \cos \beta - 2 J_{yz} \cos \beta \cos \gamma - 2 J_{zx} \cos \gamma \cos \alpha.$$

Аналогично для момента инерции плоской фигуры относительно оси, лежащей в плоскости этой фигуры и образующей с осью x угол α :

$$J = J_x \cos^2 \alpha + J_y \sin^2 \alpha - J_{xy} \sin 2\alpha.$$

В каждой точке тела (или плоской фигуры) можно построить такую прямоугольную систему координат, для которой центробежные моменты инерции равны нулю; оси такой системы называются главными осями инерции в данной точке тела, а моменты инерции относительно этих главных осей называются главными моментами инерции и обычно обозначаются через A, B и C .

Момент инерции тела J относительно оси, проходящей через начало координат и образующей углы α, β, γ с главными осями инерции, определяется по предыдущей формуле, в которой нужно положить:

$$J_x = A; \quad J_y = B; \quad J_z = C \text{ и}$$

$$J_{xy} = J_{yz} = J_{zx} = 0;$$

а потому

$$J = A \cos^2 \alpha + B \cos^2 \beta + C \cos^2 \gamma,$$

и (в случае плоской фигуры)

$$J = A \cos^2 \alpha + B \sin^2 \alpha.$$

Если из произвольной точки данного тела, принятой за начало координат O , проведём пучок осей и вдоль каждой из этих осей отложим от точки O отрезок, равный $\frac{1}{\sqrt{J}}$, где J — момент инерции тела относительно этой оси, то геометрическим местом концов таких отрезков является поверхность эллипсоида, центр которого совпадает с точкой O и уравнение которого имеет вид

$$J_x x^2 + J_y y^2 + J_z z^2 - 2 J_{xy} xy - 2 J_{yz} yz - 2 J_{zx} zx = 1.$$

Этот эллипсоид называется эллипсоидом инерции; оси этого эллипсоида совпадают с главными осями инерции тела в точке O . Если оси координат, имеющие начало в точке O , направим по главным осям инерции тела в этой точке, то уравнение эллипсоида инерции упрощается, так как в нём исчезают члены, содержащие

произведения двух координат; это уравнение принимает вид

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 = 1.$$

Если из трёх коэффициентов A, B, C два равны, то эллипсоид инерции является эллипсоидом вращения. Если $A = B = C$, то эллипсоид инерции превращается в шар.

Если эллипсоид инерции построен, то момент инерции тела относительно любой оси l , проходящей через центр O этого эллипсоида, находится весьма просто: обозначая через L точку пересечения оси l с поверхностью эллипсоида инерции, будем, очевидно, иметь

$$J_l = \frac{1}{OL^2}.$$

Эллипсоид инерции, центр которого совпадает с центром тяжести тела, называется центральным эллипсоидом инерции, а его оси называются главными центральными осями инерции тела.

Если тело имеет плоскость симметрии, то одна из главных центральных осей инерции тела перпендикулярна к этой плоскости, а две другие лежат в этой плоскости. Если тело имеет ось симметрии, то эта ось является одной из главных центральных осей инерции тела, а две другие оси лежат в плоскости, перпендикулярной к оси симметрии.

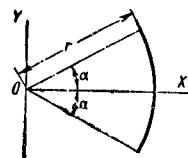
МОМЕНТЫ ИНЕРЦИИ НЕКОТОРЫХ ОДНОРОДНЫХ ЛИНИЙ, ФИГУР И ТЕЛ

В нижеследующих формулах ρ обозначает плотность, т. е. массу, приходящуюся на единицу объёма или на единицу площади или на единицу длины, и M обозначает массу данного тела (фигуры, линии).

Прямолинейный отрезок

$AB = l$. Ось x проходит через точку A и образует с направлением AB угол α .

$$J_x = \frac{\rho}{3} l^3 \sin^2 \alpha = \frac{M h^2}{3},$$



где h — расстояние точки B от оси x .

Фиг. 49

Дуга круга радиуса r с центральным углом 2α (фиг. 49):

$$J_x = \rho \frac{r^3}{2} (2\alpha - \sin 2\alpha) = M \frac{r^2}{2} \left(1 - \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha} \right);$$

$$J_y = \rho \frac{r^3}{2} (2\alpha + \sin 2\alpha) = M \frac{r^2}{2} \left(1 + \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha} \right);$$

$$J_0 = 2 \rho \alpha r^3 = M r^2.$$

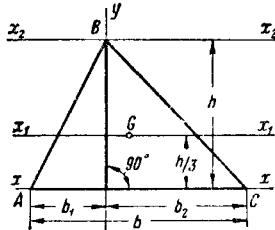
Треугольник. G — центр тяжести треугольника (фиг. 50)

$$J_{x_1} = \rho \frac{bh^3}{4} = M \frac{h^2}{2}; \quad J_{x_2} = \rho \frac{bh^3}{36} = M \frac{h^2}{18}; \quad J_x = \rho \frac{bh^3}{12} = M \frac{h^2}{6};$$

$$J_y = \rho \frac{h(b_1^3 + b_2^3)}{12} = M \frac{b_1^3 + b_2^3}{6b};$$

$$J_B = \rho \left[\frac{bh^3}{4} + \frac{h(b_1^3 + b_2^3)}{12} \right] =$$

$$= \frac{M}{2} \left[h^2 + \frac{b_1^3 + b_2^3}{3b} \right];$$



Фиг. 50

$$J_G = \rho \left[\frac{bh^3}{36} + \frac{h(b_1^3 + b_2^3)}{12} - \frac{bh(b_2 - b_1)^2}{18} \right] =$$

$$= M \frac{a^2 + b^2 + c^2}{36},$$

где a, b, c — стороны треугольника.

Момент инерции относительно любой оси, проходящей через центр тяжести, равен

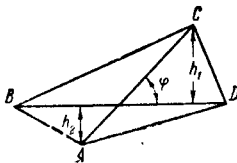
$$J = \frac{M}{12} (d_A^2 + d_B^2 + d_C^2),$$

где d_A, d_B, d_C — расстояния вершин треугольника от этой оси.

Неправильный четырехугольник ABCD (фиг. 51)

$$J_{BD} = \rho \frac{BD(h_1^3 + h_2^3)}{12} =$$

$$= \frac{M}{6} \cdot \frac{h_1^3 + h_2^3}{h_1 + h_2} = \frac{M}{6} (h_1^3 - h_1 h_2 + h_2^3).$$



Фиг. 51

Параллелограмм ABCD. Угол между диагоналями AC и BD равен φ .

$$J_{BD} = \rho \frac{BD(AC \sin \varphi)^3}{48} =$$

$$= \frac{M}{24} (AC \sin \varphi)^2.$$

Ромб ABCD

$$J_{BD} = \rho \frac{BD \cdot AC^3}{48} = \frac{M}{24} AC^2.$$

Прямоугольник (фиг. 52)

$$J_x = \rho \frac{ba^3}{12} = M \frac{a^2}{12}; J_y = \rho \frac{b^3a}{12} =$$

$$= M \frac{b^2}{12}; J_{x_1} = \rho \frac{ba^3}{3} = M \frac{a^2}{3};$$

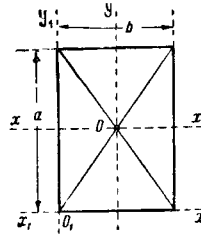
$$J_{y_1} = \rho \frac{ab^3}{3} = M \frac{b^2}{3};$$

$$J_0 = \rho \frac{ab(b^2 + a^2)}{12} = M \frac{a^2 + b^2}{12}.$$

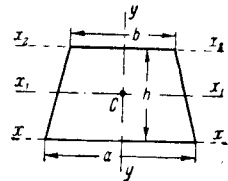
Квадрат со стороной a . Момент инерции относительно любой оси, проходящей через центр тяжести O квадрата, равен

$$J = \rho \frac{a^4}{12} = M \frac{a^2}{12}; J_0 = \rho \frac{a^4}{6} = M \frac{a^2}{6}.$$

Равнобедренная трапеция (фиг. 53). Точка C — центр тяжести трапеции.



Фиг. 52



Фиг. 53

$$J_x = \rho \frac{h^3(a + 3b)}{12} = M \frac{h^2}{6} \cdot \frac{a + 3b}{a + b};$$

$$J_{x_2} = \rho \frac{h^3(3a + b)}{12} = M \frac{h^2}{6} \cdot \frac{3a + b}{a + b}.$$

$$J_y = \rho \frac{h}{48} \cdot \frac{a^4 - b^4}{a - b} = M \frac{a^2 + b^2}{24};$$

$$J_{x_1} = \rho \frac{h^3}{36} \cdot \frac{a^2 + 4ab + b^2}{a + b} =$$

$$= M \frac{h^2}{18} \cdot \frac{a^2 + 4ab + b^2}{(a + b)^2}.$$

Правильный многоугольник. Если a — сторона, n — число сторон, r — радиус вписанного, R — радиус описанного круга, то для момента инерции относительно всякой оси, проходящей через центр тяжести O многоугольника, имеем

$$J = \rho \frac{nar(12r^2 + a^2)}{96} = M \frac{12r^2 + a^2}{48} =$$

$$= M \frac{6R^2 - a^2}{24}; J_0 = 2J.$$

Круг. Момент инерции относительно любого диаметра

$$J = \rho \frac{\pi r^4}{4} = \rho \frac{\pi d^4}{64} = M \frac{r^2}{4};$$

момент инерции относительно центра O круга

$$J_0 = \rho \frac{\pi r^4}{2} = \rho \frac{\pi d^4}{32} = M \frac{r^2}{2},$$

где r — радиус круга и d — его диаметр.

Половина круга. Ось y направлена по оси симметрии. Начало координат в центре полукруга O .

$$J_x = J_y = \rho \frac{\pi r^4}{8} = M \frac{r^2}{4};$$

$$J_0 = \rho \frac{\pi r^4}{4} = M \frac{r^2}{2}.$$

Полярный момент инерции относительно центра тяжести

$$J_c = \rho \frac{\pi r^4}{4} \left(1 - \frac{32}{9\pi^2}\right) = M \frac{r^2}{2} \left(1 - \frac{32}{9\pi^2}\right) = 0,3198 Mr^2.$$

Круглое плоское кольцо: внешний радиус — R , внутренний радиус — r .

Момент инерции относительно любого диаметра

$$J = \rho \frac{\pi (R^4 - r^4)}{4} = M \frac{R^2 + r^2}{4}.$$

Момент инерции относительно центра O

$$J_0 = 2J.$$

Круговой сектор радиуса r . Ось x направлена по оси симметрии; начало координат — в центре O дуги сектора.

$$J_x = \rho \frac{r^4}{8} (2\alpha - \sin 2\alpha) = M \frac{r^2}{4} \left(1 - \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}\right);$$

$$J_y = \rho \frac{r^4}{8} (2\alpha + \sin 2\alpha) = M \frac{r^2}{4} \left(1 + \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}\right);$$

$$J_0 = \rho \frac{r^4}{2} \alpha = M \frac{r^2}{2},$$

где α — половина центрального угла дуги сектора (в радианах).

Полярный момент инерции относительно центра тяжести

$$J_c = \rho \frac{r^4}{2} \alpha \left(1 - \frac{8}{9} \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2}\right) = M \frac{r^2}{2} \left(1 - \frac{8}{9} \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2}\right).$$

Круговой сегмент радиуса r . Оси координат выбраны так же, как в предыдущем случае

$$J_x = \rho \frac{r^4}{8} \left(2\alpha - \frac{4}{3} \sin 2\alpha + \frac{1}{6} \sin 4\alpha\right) = M \frac{r^2}{4} \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{\sin^2 \alpha \sin 2\alpha}{2\alpha - \sin 2\alpha}\right);$$

$$J_y = \rho \frac{r^4}{8} \left(2\alpha - \frac{1}{2} \sin 4\alpha\right) = M \frac{r^2}{4} \left(1 + \frac{2 \sin^2 \alpha \sin 2\alpha}{2\alpha - \sin 2\alpha}\right);$$

$$J_0 = \rho \frac{r^4}{2} \left(\alpha - \frac{1}{3} \sin 2\alpha - \frac{1}{12} \sin 4\alpha\right) = M \frac{r^2}{2} \left(1 + \frac{2 \sin^2 \alpha \sin 2\alpha}{2\alpha - \sin 2\alpha}\right),$$

где α — половина центрального угла дуги сегмента.

Площадь эллипса. Начало координат O — в центре эллипса; оси x и y совпадают с осями эллипса. Полуоси эллипса равны a и b .

$$J_x = \rho \frac{\pi ab^3}{4} = M \frac{b^2}{4}; \quad J_y = \rho \frac{\pi a^3 b}{4} = M \frac{a^2}{4};$$

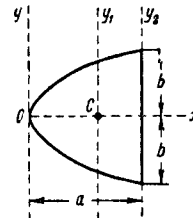
$$J_0 = \rho \frac{\pi ab}{4} (a^2 + b^2) = M \frac{a^2 + b^2}{4}.$$

Параболический сегмент (фиг. 54):

$$J_x = \rho \frac{4ab^3}{15} = M \frac{b^2}{5}; \quad J_y = \rho \frac{4a^3b}{7} =$$

$$= M \frac{3a^2}{7}; \quad J_{y_s} = \rho \frac{32a^2b}{105} = M \frac{8a^2}{35};$$

$$I_{y_1} = \rho \frac{16a^3b}{175} = M \frac{12a^2}{175}.$$



Фиг. 54

Прямая призма или прямой цилиндр с площадью основания s и высотой h . Начало координат O — в центре тяжести призмы (цилиндра); ось z перпендикулярна к основанию призмы (цилиндра). Если обозначим моменты инерции площади поперечного сечения призмы (цилиндра) плоскостью Oxy относительно осей z и x через J'_z и J'_x , то

$$J_x = \rho h \left(J'_x + \frac{1}{12} sh^2 \right) = \frac{M}{s} \left(J'_x + \frac{1}{12} sh^2 \right);$$

$$J_z = \rho h J'_z = \frac{M}{s} J'_z.$$

Прямоугольный параллелепипед. Оси x , y , z проходят через центр тяжести и параллельны соответственно ребрам параллелепипеда a , b , c :

$$J_x = \rho \frac{abc}{12} (b^2 + c^2) =$$

$$= M \frac{b^2 + c^2}{12}; \quad J_y = M \frac{c^2 + a^2}{12};$$

$$J_z = M \frac{a^2 + b^2}{12}.$$

Куб. Оси координат выбраны так же, как в предыдущем случае

$$J_x = J_y = J_z = \rho \frac{a^5}{6} = M \frac{a^2}{6},$$

где a — ребро куба.

Прямой круглый цилиндр. Радиус основания — r , высота — h ; оси x , y , z выбраны так же, как в случае прямой призмы:

$$J_z = \rho \frac{\pi r^4 h}{2} = M \frac{r^2}{2};$$

$$J_x = J_y = \rho \frac{\pi r^2 h}{12} (3r^2 + h^2) = M \frac{3r^2 + h^2}{12}.$$

Момент инерции относительно оси, образующей с осью z угол φ ,

$$J_1 = \rho \frac{\pi r^2 h}{12} [3r^2 (1 + \cos^2 \varphi) + h^2 \sin^2 \varphi] = \\ = \frac{M}{12} [3r^2 (1 + \cos^2 \varphi) + h^2 \sin^2 \varphi].$$

Боковая поверхность прямого круглого цилиндра. Обозначения те же и оси x, y, z выбраны так же, как в предыдущем случае

$$J_z = \rho 2\pi r^3 h = Mr^2; \\ J_x = J_y = \rho \frac{\pi r h}{6} (6r^2 + h^2) = M \frac{6r^2 + h^2}{12}.$$

Полый круглый цилиндр. R и r — внешний и внутренний радиусы, h — высота; оси x, y, z выбраны так же, как в предыдущем случае:

$$J_z = \rho \frac{\pi h}{2} (R^4 - r^4) = M \frac{R^2 + r^2}{2}; \\ J_x = J_y = \rho \cdot \frac{\pi h (R^2 - r^2)}{4} \left(R^2 + r^2 + \frac{h^2}{3} \right) = \\ = M \frac{R^2 + r^2 + \frac{1}{3} h^2}{4}.$$

Пирамида или конус. Высота — h ; площадь основания — s . Ось z совпадает с высотой и проходит через центр тяжести основания; ось x перпендикулярна к оси z и проходит через центр тяжести пирамиды (конуса). Если обозначить моменты инерции площади основания относительно оси z и относительно оси x' , параллельной оси x и проходящей через центр тяжести основания, через J'_z и $J'_{x'}$, то

$$J_z = \frac{1}{5} \rho h J'_z = \frac{3}{5} \frac{M}{s} J'_z; \\ J_x = \frac{\rho h}{80} (16 J'_{x'} + sh^2) = \frac{3}{80} \frac{M}{s} (16 J'_{x'} + sh^2).$$

Если основание пирамиды — прямоугольник со сторонами a и b и ось x параллельна стороне a , то

$$J_z = \rho \frac{abh}{60} (a^2 + b^2) = M \frac{a^2 + b^2}{20}; \\ J_x = \rho \frac{abh}{60} \left(b^2 + \frac{3h^2}{4} \right) = M \frac{4b^2 + 3h^2}{80}.$$

В случае круглого конуса, радиус основания которого равен r , имеют:

$$J_z = \rho \frac{\pi h r^4}{10} = \frac{3}{10} Mr^2; \\ J_x = \rho \frac{\pi r^2 h}{20} \left(r^2 + \frac{h^2}{4} \right) = \frac{3}{20} M \left(r^2 + \frac{h^2}{4} \right).$$

Боковая поверхность круглого конуса. Ось z совпадает с осью вращения конуса;

$$J_z = \rho \frac{\pi r^3 l}{2} = M \frac{r^2}{2},$$

где l — длина образующей конуса и r — радиус его основания.

Усеченный круглый конус. Радиусы параллельных оснований — R и r , высота — h , образующая — l ; ось z совпадает с осью вращения;

$$J_z = \rho \frac{\pi h}{10} \cdot \frac{R^5 - r^5}{R - r} = \frac{3}{10} M \cdot \frac{R^5 - r^5}{R^3 - r^3}.$$

Для боковой поверхности усеченного круглого конуса имеют

$$J_z = \rho \frac{\pi l}{2} \cdot \frac{R^4 - r^4}{R - r} = M \frac{R^2 + r^2}{2}.$$

Шар. Радиус — r ; центр — O .

$$J_0 = \rho \frac{4}{5} \pi r^5 = \frac{3}{5} Mr^2;$$

момент инерции относительно любого диаметра

$$J = \rho \frac{8\pi r^5}{15} = \frac{2}{5} Mr^2.$$

Полушар радиуса r . Если начало координат находится в центре полушара O и ось z совпадает с осью симметрии, то

$$J_x = J_y = J_z = \rho \frac{4\pi r^5}{15} = \\ = \frac{2}{5} Mr^2; J_0 = \frac{3}{5} Mr^2.$$

Полый шар. R — внешний радиус, r — внутренний радиус; момент инерции относительно любого диаметра

$$J = \rho \frac{8\pi}{15} (R^5 - r^5) = \frac{2}{5} M \frac{R^5 - r^5}{R^3 - r^3}.$$

Поверхность шара радиуса r . Относительно любого диаметра момент инерции

$$J = \rho \frac{8\pi r^4}{3} = \frac{2}{3} Mr^2.$$

Шаровой сегмент. Высота — h ; радиус шара — r ; ось z совпадает с осью симметрии

$$J_z = \rho \frac{\pi h^3}{30} (20r^2 - 15rh + 3h^2) = \\ = M \frac{h}{10} \cdot \frac{20r^2 - 15rh + 3h^2}{3r - h}.$$

Шаровой сектор. Радиус шара — r ; высота шарового сегмента — h . Ось z совпадает с осью симметрии;

$$J_z = \rho \frac{2\pi r^2 h^3}{15} (3r - h) = M \frac{h}{5} (3r - h).$$

Параболоид вращения. Высота — h ; радиус основания — r . Ось z совпадает с осью вращения. Начало координат — в центре тяжести параболоида;

$$J_z = \frac{1}{6} \pi \rho h r^4 = \frac{1}{3} Mr^2;$$

$$J_x = J_y = \frac{1}{36} \pi \rho r^2 h (3r^2 + h^2) = \\ = \frac{1}{18} M (3r^2 + h^2).$$

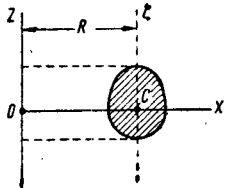
Эллипсоид. Оси координат совпадают с осями эллипсоида. Если длины полуосей эллипсоида равны a, b и c , то:

$$J_x = \frac{4}{15} \pi \rho abc (b^2 + c^2) = \frac{1}{5} M (b^2 + c^2);$$

$$J_y = \frac{4}{15} \pi \rho abc (c^2 + a^2) = \frac{1}{5} M (c^2 + a^2);$$

$$J_z = \frac{4}{15} \pi \rho abc (a^2 + b^2) = \\ = \frac{1}{5} M (a^2 + b^2).$$

Кольцо. Пусть данное тело кольцеобразной формы представляет собой тело, получающееся вращением данной плоской замкнутой фигуры вокруг оси z , лежащей в плоскости этой фигуры (фиг. 55). Пусть



Фиг. 55

эта фигура имеет ось симметрии ζ , параллельную оси z . Площадь фигуры — S ; расстояние между осями z и ζ равно R . Ось x перпендикулярна к оси z и проходит через центр тяжести C фигуры.

Если моменты инерции площади фигуры относительно осей ζ и x обозначить через J'_ζ и J'_x , то для моментов инерции рассматриваемого тела вращения относительно осей z и x имеем

$$J_z = 2\pi\rho R (R^2 S + 3 J'_\zeta);$$

$$J_x = \pi\rho R (R^2 S + 3 J'_\zeta + 2 J'_x).$$

Объём V рассматриваемого тела вращения равен (по теореме Гульдена) произведению площади вращаемой фигуры на длину окружности, описываемой её центром тяжести, т. е.

$$V = 2\pi RS,$$

а потому масса этого тела

$$M = 2\pi\rho RS.$$

Следовательно,

$$J_z = \frac{M}{S} (R^2 S + 3 J'_\zeta);$$

$$J_x = \frac{M}{2S} (R^2 S + 3 J'_\zeta + 2 J'_x).$$

Если вращаемая фигура есть круг радиуса r , то тело вращения называется тором. В этом случае

$$S = \pi r^2; J'_\zeta = J'_x = \frac{\pi r^4}{4},$$

а потому

$$J_z = 2\pi^2\rho R r^2 \left(R^2 + \frac{3}{4} r^2 \right) =$$

$$= M \left(R^2 + \frac{3}{4} r^2 \right);$$

$$J_x = \pi^2\rho R r^2 \left(R^2 + \frac{5}{4} r^2 \right) =$$

$$= \frac{M}{2} \left(R^2 + \frac{5}{4} r^2 \right).$$

Если вращаемая фигура есть эллипс, причём ось этого эллипса, совпадающая с осью x , равна $2a$, а его ось, совпадающая с осью ζ , равна $2b$, то

$$S = \pi ab, J'_x = \frac{\pi ab^3}{4}; J'_\zeta = \frac{\pi a^3 b}{4},$$

а потому

$$J_z = 2\pi^2\rho abR \left(R^2 + \frac{3}{4} a^2 \right) =$$

$$= M \left(R^2 + \frac{3}{4} a^2 \right);$$

$$J_x = \pi^2\rho abR \left(R^2 + \frac{3}{4} a^2 + \frac{1}{2} b^2 \right) =$$

$$= \frac{M}{2} \left(R^2 + \frac{3}{4} a^2 + \frac{1}{2} b^2 \right).$$

ТРЕНИЕ

Сопротивление, возникающее при движении одного тела по поверхности другого, называется трением.

В зависимости от вида движения различают два рода трения: трение скольжения (трение первого рода), возникающее, например, при движении поршня в цилиндре, и трение качения (трение второго рода), возникающее, например, при качении колеса по рельсу.

Так как сила трения есть сила сопротивления, то эта сила всегда направлена в сторону, противоположную относительной скорости движущегося тела.

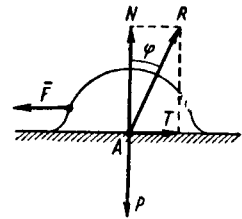
ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ

Чтобы заставить данное тело скользить под действием силы F по поверхности другого тела (фиг. 56), нужно преодолеть силу трения скольжения. Величина T силы трения скольжения пропорциональна нормальному давлению одного тела на другое, т. е.

$$T = \mu N = \mu P \text{ (закон Кулона).}$$

Коэффициент μ называется коэффициентом трения скольжения; его величина зависит от материала трущихся тел, от состояния трущихся поверхностей (шероховатость, смазка, температура и т. п.), от скорости движения и от удельного давления. Коэффициент трения скольжения имеет наибольшее значение в начале движения, т. е. в тот момент, когда тело выходит из состояния покоя, и в большинстве случаев убывает по мере того, как увеличивается относительная скорость тела. Коэффициент трения скольжения есть число отвлечённое (безразмерное).

Если трущиеся тела находятся в относительном покое, то в этом случае трение называется статическим или трением в по-



Фиг. 56

кое. Для величины T силы статического трения всегда

$$T \leq \mu_{cm} N,$$

где μ_{cm} — значение коэффициента трения скольжения, соответствующее моменту начала движения, т. е. тому моменту, когда тело выходит из состояния покоя.

Если сложить нормальную реакцию \bar{N} и силу трения \bar{T} (фиг. 56), то получим равнодействующую силу \bar{R} .

Эта сила \bar{R} составляет с нормальной реакцией угол φ , определяемый из уравнения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{T}{N} = \mu.$$

Угол φ называется углом трения. В случае статического трения углом трения называется угол φ , соответствующий на и большему значению силы статического трения; следовательно, в этом случае $\operatorname{tg} \varphi = \mu_{cm}$.

Геометрическое место прямых линий, проведенных из точки A под углом φ к направлению силы \bar{N} , есть коническая поверхность, называемая конусом трения.

Согласно многочисленным и весьма точным опытам проф. Н. П. Петрова и других исследователей, при обильной жидкой смазке трущихся поверхностей, коэффициент трения μ пропорционален:

1) коэффициенту внутреннего трения (вязкости) жидкой смазки;

2) скорости относительного движения трущихся поверхностей, и обратно пропорционален:

а) толщине слоя смазки между трущимися поверхностями;

б) удельному давлению, т. е. давлению, приходящемуся на единицу площади трущейся поверхности.

Коэффициент внутреннего трения жидкости различен для разных жидкостей; для данной жидкой смазки он зависит от её температуры и с повышением температуры смазки уменьшается.

При торможении железнодорожных вагонов для определения коэффициента трения скольжения между чугунными тормозными колодками и стальными бандажами пользуются формулой Вихерта:

$$\mu = \frac{1 + 0,0112 v}{1 + 0,06 v} \mu_0,$$

где v — скорость скольжения в км/час;

$\mu_0 = 0,45$ для сухих поверхностей;

$\mu_0 = 0,25$ для влажных поверхностей.

На основании экспериментальных данных Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ЦНИИ) для того же коэффициента получена следующая формула:

$$\mu = \frac{17}{(40 + v) \sqrt{P}},$$

где v — скорость в км/час;

P — давление в т на стандартную чугунную тормозную колодку.

Величина коэффициента трения почти не зависит от нагрева тормозных колодок; для влажных колёс эта величина уменьшается на 10—20%.

Таблица 2

Коэффициенты трения для некоторых тел при небольших давлениях (от 1 до 1,5 кг/см²)

| Трущиеся тела | Коэффициент трения скольжения при движении | | | | Коэффициент трения скольжения для момента трогания с места | | | |
|--|--|---------------|-------------------|---------------------------|--|---------------|-------------------|---------------------------|
| | трущиеся поверхности сухие | слабая смазка | нормальная смазка | поверхности смочены водой | трущиеся поверхности сухие | слабая смазка | нормальная смазка | поверхности смочены водой |
| Металл по металлу | | | | | | | | |
| Бронза по бронзе | 0,20 | — | — | — | — | — | — | — |
| » » чугуна | 0,21 | — | — | — | — | — | — | — |
| » » железа | — | 0,16 | — | — | — | — | — | — |
| Чугун по чугуну или бронзе | — | 0,15 | — | 0,31 | — | 0,16 | — | — |
| Железо по чугуну или бронзе | 0,18 | — | — | — | 0,19 | — | — | — |
| Железо по железу | 0,44 | — | — | — | — | 0,13 | — | — |
| Сталь по стали | — | — | — | — | 0,15 | — | — | — |
| Различные тела | | | | | | | | |
| Чугун по дубу | 0,49 | 0,19 | — | 0,22 | — | — | — | 0,65 |
| Железо по дубу | — | — | 0,08 | 0,26 | — | — | 0,11 | 0,65 |
| Кожаный ремень по дубовому барабану | 0,27 | — | — | — | — | 0,47 | — | — |
| Кожаный ремень по чугуну | 0,56 | — | — | 0,36 | — | 0,28 | 0,12 | 0,38 |
| Пеньковый канат по несработанному дереву | — | — | — | — | 0,50 | — | — | — |
| Пеньковый канат по полированному дереву | — | — | — | — | 0,33 | — | — | — |
| Сталь по льду | 0,014 | — | — | — | 0,027 | — | — | — |
| Камни или кирпич по кирпичу | — | — | — | — | 0,50—0,73 | — | — | — |
| Камни по железу | — | — | — | — | 0,42—0,49 | — | — | — |
| » » дереву | — | — | — | — | 0,46—0,60 | — | — | — |

Таблица 3
Коэффициенты трения металлов в зависимости от удельного давления по Ренни

| Давление в кг/см ² | Железо по железу | Чугун по железу | Сталь по чугуну | Жёлтая медь по чугуну |
|----------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|
| p | μ | μ | μ | μ |
| 8,79 | 0,140 | 0,174 | 0,166 | 0,157 |
| 13,08 | 0,250 | 0,275 | 0,300 | 0,225 |
| 15,75 | 0,271 | 0,292 | 0,333 | 0,219 |
| 18,23 | 0,285 | 0,321 | 0,340 | 0,214 |
| 20,95 | 0,297 | 0,329 | 0,344 | 0,211 |
| 23,62 | 0,312 | 0,333 | 0,347 | 0,215 |
| 26,22 | 0,350 | 0,351 | 0,351 | 0,206 |
| 27,42 | 0,376 | 0,363 | 0,353 | 0,205 |
| 31,50 | 0,395 | 0,365 | 0,354 | 0,203 |
| 34,10 | 0,403 | 0,366 | 0,356 | 0,221 |
| 36,77 | 0,409 | 0,366 | 0,357 | 0,223 |
| 39,37 | * | 0,367 | 0,358 | 0,233 |
| 42,18 | — | 0,367 | 0,359 | 0,234 |
| 44,53 | — | 0,367 | 0,367 | 0,235 |
| 47,25 | — | 0,375 | 0,403 | 0,233 |
| 49,92 | — | 0,434 | — | 0,234 |
| 55,12 | — | —* | — | 0,232 |
| 57,65 | — | — | — | 0,273 |

* При этом давлении трущиеся поверхности оказались повреждёнными.

Таблица 4
Коэффициенты трения в зависимости от скорости

| Железные бандажи по сухим желез- ным рельсам | | Стальные бан- дажи по стальным рельсам | | Чугунные тормозные колодки по стальным бандажам | |
|---|-------|---|-------|---|-------|
| скорость в км/час | μ | скорость в км/час | μ | скорость в км/час | μ |
| 16,56 | 0,209 | 0,00 | 0,242 | 0,00 | 0,330 |
| 26,28 | 0,206 | 10,93 | 0,088 | 8,05 | 0,273 |
| 31,63 | 0,171 | 21,80 | 0,072 | 16,09 | 0,242 |
| 51,48 | 0,145 | 43,90 | 0,070 | 40,03 | 0,166 |
| 72,00 | 0,136 | 65,80 | 0,057 | 72,36 | 0,127 |
| 79,20 | 0,112 | 87,60 | 0,038 | 96,48 | 0,074 |

Таблица 5
Коэффициент трения для деревянных тормозных колодок (при скорости от 1 до 20 м/сек и при давлении от 0,50 до 10 кг/см²)

| Материал | Бук | Дуб | Тополь | Вяз | Ива |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Чугун . . . | 0,29— 0,37 | 0,30— 0,34 | 0,35— 0,40 | 0,36— 0,37 | 0,46— 0,47 |
| Железо . . | 0,54 | 0,51— 0,40 | 0,65— 0,60 | 0,60— 0,49 | 0,63— 0,60 |

Значения коэффициентов трения скольжения железнодорожных вагонов со стальными бандажами по стальным рельсам в зависимости от скорости приведены в табл. 6.

Таблица 6

| Скорость в км/час | 10 | 30 | 50 | 70 | 90 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|
| Коэффициент трения μ | 0,10 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,04 |

Для определения коэффициента трения скольжения железнодорожных вагонов пользуются также формулой Боше:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + 0,03v},$$

где v — скорость в м/сек;

μ_0 — коэффициент, равный 0,31 для очень сухих рельсов, 0,22 для сухих рельсов и 0,14 для мокрых рельсов.

Кроме коэффициента трения скольжения важное значение имеет коэффициент сцепления ψ между колесом и рельсом. Коэффициентом сцепления называется отношение наибольшего возможного при отсутствии бокового окружного усилия на колесе к нормальному давлению колеса на рельс. Весьма важная роль коэффициента сцепления при расчётах объясняется тем, что значение этого коэффициента лимитирует величину тяговой силы.

На основании многочисленных исследований для определения коэффициента сцепления при различных скоростях от нуля до 150 км/час предложены эмпирические формулы, например

$$\psi = \frac{1}{\alpha + 0,035v},$$

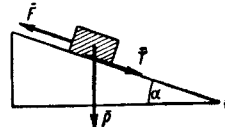
где v — скорость в км/час, а величина α колеблется в пределах от 3,8 до 4,7.

Как видно из этой формулы, коэффициент сцепления уменьшается при увеличении скорости.

ТРЕНИЕ ПРИ ДВИЖЕНИИ ТЕЛА ПО НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Пусть тело весом P кг движется равномерно вверх по наклонной плоскости под действием силы \vec{F} , параллельной этой плоскости (фиг. 57); угол наклона плоскости равен α . Величина силы \vec{F} , необходимой для равномерного поднятия тела по наклонной плоскости, определяется по формуле

$$F = P \frac{\sin(\alpha + \varphi)}{\cos \varphi},$$



Фиг. 57

где φ — угол трения,
т. е. $\operatorname{tg} \varphi = \mu$.

Если $\alpha > \varphi$, то при равномерном спуске тела по наклонной плоскости

$$F = P \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\cos \varphi}.$$

Сила \vec{F} является в этом случае для тела тормозящей силой; при отсутствии этой силы и при $\alpha > \varphi$ движение тела вниз по наклонной плоскости было бы ускоренным.

Если $\alpha < \varphi$, то в этом случае для равномерного спуска тела по наклонной плоскости сила \vec{F} должна иметь направление, противоположное указанному на фиг. 57, и

$$F = P \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{\cos \varphi}.$$

Если $\alpha = \varphi$, то $F = 0$; следовательно, в этом случае тело, предоставленное действию только силы тяжести, будет спускаться по наклонной плоскости равномерно (при условии, что ему сообщена некоторая начальная скорость).

Если тело, лежащее на наклонной плоскости и предоставленное действию только силы тяжести ($F = 0$), находится в покое, то это возможно только в том случае, когда составляющая веса \bar{P} , параллельная наклонной плоскости, не превышает максимального значения силы трения T , т. е.

$$P \sin \alpha \leq T_{\max}.$$

Но

$$T_{\max} = \mu_{cm} N = \mu_{cm} P \cos \alpha,$$

а потому

$$P \sin \alpha \leq \mu_{cm} P \cos \alpha$$

или

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \mu_{cm} = \operatorname{tg} \varphi_{cm}$$

и, следовательно, $\alpha \leq \varphi_{cm}$, т. е. для того, чтобы тело, лежащее на наклонной плоскости, могло оставаться в покое, угол наклона плоскости не должен превышать угла статического трения.

При поднятии тела по наклонной плоскости коэффициент полезного действия этой плоскости, равный отношению работы силы P к работе силы \bar{F} , определяется по формуле

$$\eta = \frac{\sin \alpha \cos \varphi}{\sin (\alpha + \varphi)}.$$

ТРЕНИЕ КЛИНА И ВИНТА

Клин (фиг. 58). Если клин с углом заострения 2α находится в равновесии, то, пренебрегая трением и принимая $N_1 = N$, имеют

$$P = 2 N \sin \alpha.$$

При учёте силы трения (коэффициент трения $\mu = \operatorname{tg} \varphi$, где φ — угол трения) имеем:

а) при вбивании клина

$$P = 2 N (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) = 2 N \frac{\sin (\alpha + \varphi)}{\cos \varphi};$$

б) при удерживании клина от выталкивания

$$P = 2 N (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) = 2 N \frac{\sin (\alpha - \varphi)}{\cos \varphi}.$$

Самозанимание клина происходит при $\operatorname{tg} \alpha < \mu$, т. е. при $\alpha < \varphi$.

Винт с прямоугольной нарезкой (фиг. 59). Введём следующие обозначения: вращающий момент, приложенный к винту, равен M , шаг винта — h , расстояние точек средней винтовой линии от винтовой оси — r , угол подъёма средней винтовой линии равен $\alpha = \operatorname{arctg} \frac{h}{2\pi r}$, угол трения — φ , коэффициент трения скольжения — $\mu = \operatorname{tg} \varphi$, вертикальная сила, направленная вдоль оси винта (например, вес поднимаемого груза), равна Q . Тогда при равномерном поднятии груза

$$M = Q \cdot r \cdot \operatorname{tg} (\alpha + \varphi);$$

при равномерном опускании груза

$$M = Q \cdot r \cdot \operatorname{tg} (\alpha - \varphi);$$

при $\alpha \leq \varphi$ винт является самотормозящимся. Коэффициент полезного действия винта при подъёме груза равен

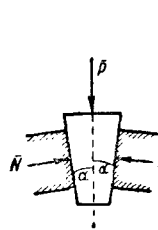
$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} (\alpha + \varphi)}.$$

Винт с треугольной нарезкой (фиг. 60). В случае винта с треугольной нарезкой, сохраняя предыдущие обозначения, имеем

$$M = Q \cdot r \cdot \operatorname{tg} (\alpha \pm \varphi'),$$

где

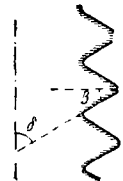
$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi' &= \mu' = \mu \cos \alpha \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} + \operatorname{tg}^2 \beta = \\ &= \mu \sqrt{1 + \cos^2 \alpha \operatorname{tg}^2 \beta}. \end{aligned}$$



Фиг. 58



Фиг. 59



Фиг. 60

Если угол α невелик, то приближённо можно принять $\cos \alpha \approx 1$ и, следовательно,

$$\operatorname{tg} \varphi' = \mu' = \mu \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta} = \frac{\mu}{\cos \beta},$$

или

$$\mu' = \frac{\mu}{\sin \delta}.$$

Так как $\mu' > \mu$, то в винтах с прямоугольной нарезкой трение меньше, чем в винтах с треугольной нарезкой; поэтому первые применяются преимущественно в подъёмных устройствах, а вторые — в крепящих устройствах (болты).

ТРЕНИЕ ЦАПФ

Поддерживающая цилиндрическая цапфа. Опорное давление \bar{P} перпендикулярно к оси вала.

Общий момент сил трения относительно оси вращения вала равен

$$M_{mp} = \rho P \rho,$$

где ρ — радиус цапфы.

Мощность, расходуемая на преодоление трения цапфы, равна

$$N = M_{mp} \omega = \rho P \rho \omega = \rho P \rho \frac{\pi n}{30},$$

где ω — угловая скорость вала;

n — число оборотов в минуту.

Пятовая цапфа. Опорное давление \bar{P} направлено вдоль оси вала. Трением поверхности является торец цапфы (круг). Общий момент сил трения относительно оси вращения вала для сплошной круговой пяты равен

$$M_{mp} = \frac{2}{3} \rho P \rho;$$

для кольцевой пята

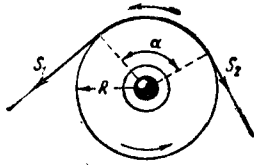
$$M_{mp} = \frac{2}{3} \mu P \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1},$$

где ρ_2 и ρ_1 — внешний и внутренний радиусы опорного кольца.

Коэффициент трения μ можно принять равным: 1) для новых цапф — от 0,06 до 0,10, в среднем $\mu = 0,08$; 2) для хорошо проработавшихся цапф — от 0,02 до 0,06, в среднем $\mu = 0,04$.

ТРЕНИЕ ГИБКИХ ТЕЛ

Если гибкое тело (ремень или канат) охватывает цилиндр (шків или барабан) и если обозначим через S_1 и S_2 натяжения ве-



Фиг. 61

дущей и ведомой частей гибкого тела (фиг. 61), то для тихоходных передач:

$$S_1 \leq S_2 e^{\mu \alpha};$$

$$S_1 - S_2 = P \leq (e^{\mu \alpha} - 1) S_1 = (e^{\mu \alpha} - 1) S_2.$$

Для быстроходных передач, учитывая центробежные силы, можно пользоваться более точными формулами:

$$S_1 - q \frac{v^2}{g} \leq \left(S_2 - q \frac{v^2}{g} \right) e^{\mu \alpha};$$

$$P \leq (1 - e^{-\mu \alpha}) \left(S_1 - q \frac{v^2}{g} \right),$$

или

$$P \leq (e^{\mu \alpha} - 1) \left(S_2 - q \frac{v^2}{g} \right),$$

где $P = S_1 - S_2$ — окружное усилие, передаваемое гибким телом цилиндру;

e — основание натуральных логарифмов;

α — угол (в радианах) обхвата гибким телом цилиндра;

μ — коэффициент трения гибкого тела о цилиндр (табл. 7);

q — вес погонной единицы длины гибкого тела (ремня, каната);

v — линейная скорость гибкого тела (ремня, каната);

g — ускорение силы тяжести;

$e^{\mu \alpha}$ — см. табл. 8.

Знак равенства имеет место, если гибкое тело скользит по цилиндру, знак неравенства — при относительном покое.

Таблица 7

Коэффициенты трения

| Кожанные ремни | | | | Пеньковые канаты | | Железные тормозные ленты |
|----------------------|--------------------|--------------|------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|
| по деревянным шкивам | по чугунным шкивам | | | по железным барабанам | по деревянным барабанам | по чугунным колёсам |
| | состояние ремня | | | | | |
| | сильно смазан | слабо смазан | сырой | | | |
| $\mu=0,47$ | $\mu=0,12$ | $\mu=0,28$ | $\mu=0,38$ | $\mu=0,25$ | $\mu=0,40$ | $\mu=0,18$ |

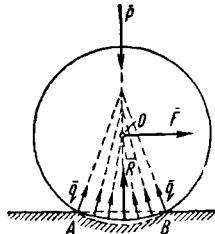
Таблица 8

Значения $e^{\mu \alpha}$

| $\frac{\alpha}{2\pi}$ | μ | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 |
| 0,1 | 1,00 | 1,10 | 1,13 | 1,17 | 1,21 | 1,25 | 1,29 | 1,33 | 1,37 |
| 0,2 | 1,13 | 1,21 | 1,29 | 1,37 | 1,46 | 1,55 | 1,65 | 1,76 | 1,87 |
| 0,3 | 1,21 | 1,32 | 1,45 | 1,60 | 1,76 | 1,93 | 2,13 | 2,34 | 2,57 |
| 0,4 | 1,29 | 1,46 | 1,65 | 1,87 | 2,12 | 2,41 | 2,73 | 3,10 | 3,51 |
| 0,5 | 1,37 | 1,60 | 1,87 | 2,19 | 2,57 | 3,00 | 3,51 | 4,11 | 4,81 |
| 0,6 | 1,46 | 1,76 | 2,13 | 2,57 | 3,10 | 3,74 | 4,52 | 5,45 | 6,59 |
| 0,7 | 1,55 | 1,93 | 2,41 | 3,00 | 3,74 | 4,66 | 5,81 | 7,24 | 9,02 |
| 0,8 | 1,65 | 2,13 | 2,73 | 3,51 | 4,52 | 5,81 | 7,47 | 9,60 | 12,35 |
| 0,9 | 1,76 | 2,34 | 3,10 | 4,11 | 5,45 | 7,04 | 9,60 | 12,74 | 16,90 |
| 1,0 | 1,87 | 2,57 | 3,51 | 4,81 | 6,59 | 9,02 | 12,35 | 16,90 | 23,14 |
| 1,5 | 2,57 | 4,11 | 6,59 | 10,55 | 16,90 | 27,08 | 43,38 | 69,49 | 111,32 |
| 2,0 | 3,51 | 6,59 | 12,35 | 23,14 | 43,38 | 81,31 | 152,40 | 285,68 | 535,49 |
| 2,5 | 4,81 | 10,55 | 23,14 | 50,75 | 111,32 | 244,15 | 535,49 | 1 174,5 | 2 575,9 |
| 3,0 | 6,59 | 16,90 | 43,38 | 111,32 | 285,68 | 733,14 | 1 881,5 | 4 828,5 | 12 391 |
| 3,5 | 9,02 | 27,08 | 81,31 | 244,15 | 733,14 | 2 192,9 | 6 610,7 | 19 851 | 59 608 |
| 4,0 | 12,35 | 39,38 | 152,40 | 535,49 | 1 881,5 | 6 610,7 | 23 227 | 81 610 | 286 744 |

ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ

Пусть цилиндрический каток находится в покое на горизонтальной плоскости под действием вертикальной силы P (например, под действием собственного веса). Каток получит деформацию и кривизна его контура на участке AB несколько изменится (фиг. 62). Опорная площадка AB также получит деформацию: из плоской она становится цилиндрической.



Фиг. 62

Вследствие полной симметрии все элементарные силы реакции q опорной площадки приведутся к одной равнодействующей \bar{R} , которая пройдет через центр катка O . Как только к катку будет приложена горизонтальная сила \bar{F} (фиг. 62), каток будет стремиться скользить по плоскости, но вследствие трения на участке AB , препятствующего скольжению, он будет поворачиваться по часовой стрелке, причём элементарные силы реакций q слева будут уменьшаться, а справа увеличиваться.

При этих условиях равнодействующая R не пройдет через центр O , и в результате сила \bar{F} должна будет преодолеть сопротивление, называемое трением качения. Величина силы \bar{F} , необходимая для преодоления этого сопротивления, определяется из уравнения

$$Fr = \lambda P$$

или

$$F = \lambda \frac{P}{r},$$

где r — радиус катка;

λ — коэффициент трения качения, имеющий размерность линейной величины (длины).

Таблица 9

| Трущиеся тела | Коэффициент трения качения λ в см |
|--|---|
| Дерево по дереву | 0,05—0,06 |
| Мягкая сталь по мягкой стали | 0,005 |
| Дерево по стали | 0,03—0,04 |
| Шарик из закалённой стали по стали | 0,001 |

Если горизонтальная сила \bar{F} приложена не в центре катка, а в его самой верхней точке, то

$$F = \lambda \frac{P}{2r}.$$

При перемещении груза с помощью катков (фиг. 63) имеют

$$F = \frac{\lambda(P + 2p) + \lambda'P}{2r},$$

где P — вес груза (вместе с доской);

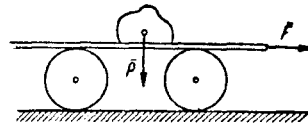
p — вес катка;

λ — коэффициент трения качения между катком и горизонтальной плоскостью, по которой он катится;

λ' — коэффициент трения качения между катком и доской, на которой лежит груз.

Если вес катков мал по сравнению с весом груза, то им можно пренебречь, и тогда

$$F = \frac{(\lambda + \lambda')P}{2r}$$



Фиг. 63

Кроме вышеуказанной формулы Кулона для определения силы F , необходимой для преодоления трения качения (сопротивления перекатыванию), в настоящее время применяются и другие формулы, например:

$$F = c \sqrt[3]{\frac{P^4}{lr^3}} = c \frac{P}{r} \sqrt[3]{\frac{r}{l}},$$

где P — вертикальная нагрузка на катящийся цилиндр;

r — его радиус;

l — длина образующей и

c — коэффициент, зависящий от механических свойств грунта.

Коэффициент μ общего сопротивления движению вагонов (включая силу сопротивления воздуха). Для железнодорожных вагонов μ можно принимать в зависимости от ширины колес (на прямом участке пути):

| Ширина колес | Коэффициент μ |
|----------------------|---------------------------------|
| Нормальная | $0,0025 + 0,6 \cdot 10^{-6}v^2$ |
| 1000 мм | $0,0026 + 0,3 \cdot 10^{-6}v^2$ |
| 750 » | $0,0027 + 0,2 \cdot 10^{-6}v^2$ |
| 600 » | $0,0028 + 0,2 \cdot 10^{-6}v^2$ |

где v — скорость вагона в км/час.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. М.—Л., ГТТИ, 1940, 762 с.
 Бухгольц Н. Н. Основы курса теоретической механики, 5-е изд., ч. 1—2. М.—Л., Гостехиздат, 1945. Ч. 1. Кинематика, статика, динамика материальной частицы; 371 с. Ч. 2. Динамика системы частиц, 248 с.
 Воронков И. М. Курс теоретической механики. 3-е изд. М.—Л., Гостехиздат, 1944, 436 с.
 Кирпичев В. Л. Основания графической статистики, 6-е изд., М.—Л., ГТТИ, 1933, 227 с.
 Левенсон Л. Б. Теория механизмов и машин, Кинематика и динамика механизмов. М., Машгиз, 1948, 406 с.
 Лойцянский Л. Г. и Лурье А. И. Курс

теоретической механики. 3-е изд. Ч. 1—2. М.—Л., Гостехиздат, 1940. Ч. 1. Статика и кинематика, 324 с. Ч. 2. Динамика, 468 с.
 Некрасов А. И. Курс теоретической механики, 3-е изд. М.—Л., Гостехиздат, 1945—1946. Т. 1. Статика и кинематика, 1945, 355 с. Т. 2. Динамика, 1946, 456 с.
 Николаи Е. Л. Теоретическая механика. Ч. 1—3. 1938—1939. Ч. 1. 1. Статика твёрдого тела. 2. Кинематика, 13-е изд. 1938, 258 с. Ч. 2. Динамика, 7-е изд. 1939, 284 с. Ч. 3. 1. Уравнения Лагранжа. 2. Теория малых колебаний. 3. Теория гироскопов, 1939, 310 с.
 Сулов Г. К. Теоретическая механика. 3-е изд. М.—Л., Гостехиздат, 1946, 656 с.

ГИДРОМЕХАНИКА



ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ .

УДЕЛЬНЫЙ ВЕС И ПЛОТНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ

Жидкими телами, или просто жидкостями, называются тела, легко изменяющие свою форму и не оказывающие заметного сопротивления сдвигу. Все жидкости делятся на капельные жидкости, характеризующиеся очень малой сжимаемостью, и газообразные жидкости (газы), сжимаемость которых весьма велика.

Плотностью жидкости называется масса жидкости, заключённая в единице объёма

$$\rho = \frac{M}{V} \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}^4} \right] \text{ или } \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right].$$

Удельным весом жидкости называется вес единицы объёма жидкости:

$$\gamma = \frac{G}{V} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right] \text{ или } \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^3 \cdot \text{сек}^2} \right].$$

Удельный вес и плотность связаны между собой равенством

$$\gamma = \rho \cdot g,$$

где g — ускорение силы тяжести.

Значения удельных весов некоторых жидкостей в зависимости от температуры и некоторых газов при 15°C и 750 мм рт. ст., а также воздуха в зависимости от температуры и давления приведены в табл. 1—5.

Таблица 1
Удельный вес жидкостей в зависимости от температуры

| Наименование жидкости | Температура в °C | γ в кг/м³ |
|------------------------------|------------------|------------------|
| Вода пресная | 15 | 999 |
| » морская | 15 | 1 020 |
| Ртуть | 15 | 13 558 |
| Касторовое масло | 15 | 970 |
| Керосин | 15 | 790—820 |
| Бензин | 15 | 680—780 |
| Бензол | 0 | 900 |
| Ацетон | 20 | 790 |
| Древесный спирт | 0 | 800 |
| Альголь | 15 | 790 |
| Глицерин безводный | 0 | 1 260 |
| Нефть | 20 | 760—900 |

Таблица 2
Удельный вес воды в зависимости от температуры

| Температура в °C | γ в г/см³ | Температура в °C | γ в г/см³ | Температура в °C | γ в г/см³ | Температура в °C | γ в г/см³ |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 0 | 0,99987 | 22 | 0,99780 | 44 | 0,99066 | 64 | 0,98113 |
| 2 | 0,99997 | 24 | 0,99732 | 46 | 0,98982 | 66 | 0,98005 |
| 4 | 1,00000 | 26 | 0,99681 | 48 | 0,98896 | 68 | 0,97894 |
| 6 | 0,99997 | 28 | 0,99626 | 50 | 0,98807 | 70 | 0,97781 |
| 8 | 0,99988 | 30 | 0,99567 | 52 | 0,98715 | 75 | 0,97489 |
| 10 | 0,99973 | 32 | 0,99505 | 54 | 0,98621 | 80 | 0,97183 |
| 12 | 0,99953 | 34 | 0,99440 | 56 | 0,98525 | 85 | 0,96865 |
| 14 | 0,99927 | 36 | 0,99371 | 58 | 0,98425 | 90 | 0,96534 |
| 16 | 0,99897 | 38 | 0,99299 | 60 | 0,98324 | 95 | 0,96192 |
| 18 | 0,99862 | 40 | 0,99224 | 62 | 0,98220 | 100 | 0,95838 |
| 20 | 0,99823 | 42 | 0,99147 | | | | |

Таблица 3
Удельный вес ртути в зависимости от температуры

| Температура в °C | γ в г/см³ | Температура в °C | γ в г/см³ |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| —20 | 13,645 | + 50 | 13,472 |
| —10 | 13,620 | + 60 | 13,448 |
| 0 | 13,595 | + 70 | 13,424 |
| +10 | 13,570 | + 80 | 13,400 |
| +20 | 13,546 | + 90 | 13,376 |
| +30 | 13,522 | +100 | 13,351 |
| +40 | 13,497 | | |

Таблица 4
Удельный вес газов при 15° C и атмосферном давлении 750 мм рт. ст.

| Наименование газа | γ в кг/м³ | Наименование газа | γ в кг/м³ |
|--------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Воздух | 1,209 | Углекислота . . | 1,804 |
| Кислород | 1,312 | Водяной пар . . | 0,739 |
| Водород | 0,0827 | Окись углерода | 1,148 |
| Гелий | 0,164 | | |

Таблица 5
Удельный вес сухого воздуха кг/м^3 в зависимости от атмосферного давления и температуры

| Температура $t, ^\circ\text{C}$ | Давление в мм рт. ст. | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 720 | 730 | 740 | 750 | 760 | 770 | 780 |
| 0 | 1,225 | 1,242 | 1,259 | 1,276 | 1,293 | 1,310 | 1,327 |
| 5 | 1,203 | 1,220 | 1,230 | 1,253 | 1,270 | 1,286 | 1,303 |
| 10 | 1,182 | 1,198 | 1,214 | 1,231 | 1,247 | 1,264 | 1,280 |
| 15 | 1,161 | 1,177 | 1,193 | 1,209 | 1,226 | 1,242 | 1,258 |
| 20 | 1,141 | 1,157 | 1,173 | 1,189 | 1,205 | 1,220 | 1,236 |
| 25 | 1,122 | 1,138 | 1,153 | 1,169 | 1,184 | 1,200 | 1,216 |
| 30 | 1,104 | 1,119 | 1,134 | 1,149 | 1,165 | 1,180 | 1,195 |

Часто удельный вес и плотность даны в условных градусах (Боме, API и т. д.). В табл. 6 приведены формулы для пересчета условных градусов в плотность и удельный вес; в таблице n — условные градусы, измеренные соответствующим ареометром.

Таблица 6
Формулы для определения удельного веса и плотности по условным градусам

| Наименование ареометров | Нормальная температура $t, ^\circ\text{C}$ | γ в г/см^3 или ρ в г/см^3 | |
|-------------------------------|--|---|--------------------------|
| | | для жидкостей тяжелее воды | для жидкостей легче воды |
| Боме (рациональный) | 15 | 144,3 | 144,3 |
| Боме Герлаха (или новый) | 17,5 | 144,3— n | 144,3+ n |
| Боме голландский (или старый) | 12,5 | 146,78 | 146,78 |
| Боме американский | 15,56 | 146,78— n | 146,78+ n |
| Баллинга | 17,5 | 144 | 144 |
| Бека | 12,5 | 144— n | 144+ n |
| Бригс-Фишера | 15,625 | 145 | 140 |
| Стоппани | 15,625 | 145— n | 130+ n |
| API (американский) | 15,56 | 200 | 200+ n |
| Картье | 12,5 | 200— n | 200+ n |
| | | 170 | 170 |
| | | 170— n | 170+ n |
| | | 400 | 400 |
| | | 400— n | 400+ n |
| | | 166 | 166 |
| | | 166— n | 166+ n |
| | | 141,5 | 141,5 |
| | | — | 131,5+ n |
| | | — | 136,8 |
| | | — | 126,1+ n |

Для определения удельного веса и плотности при данной температуре можно пользоваться следующими формулами.

Для нефти и нефтяных продуктов:

$$\gamma_t = \frac{\gamma_{15}}{1 + \beta_t(t - 15)},$$

где β_t — коэффициент объемного расширения, зависящий от плотности нефти, при $t = 15^\circ\text{C}$ (табл. 7 и 8).

Таблица 7
Значение коэффициента объемного расширения нефтепродуктов по Менделееву (γ_{15} в т/м^3)

| γ_{15} | 0,70 | 0,80 | 0,85 | 0,90 | 0,92 |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| β_t | 0,00082 | 0,00077 | 0,00072 | 0,00064 | 0,00060 |

Таблица 8
Значения коэффициента объемного расширения нефтепродуктов по Казанкину (γ_{15} в кг/м^3)

| Весовая плотность при 15°C | 700 | 710 | 720 | 740 | 760 | 780 | 800 | 820 | 830 |
|--|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $10^3 \beta$ | — | 8,97 | 8,83 | 8,51 | 8,20 | 7,90 | 7,59 | 7,39 | 7,27 |

Продолжение табл. 8

| Весовая плотность при 15°C | 840 | 850 | 860 | 870 | 880 | 890 | 900 | 920 | — |
|--|------|------|------|------|------|------|------|-----|---|
| $10^3 \beta$ | 7,12 | 7,05 | 6,94 | 6,78 | 6,62 | 6,51 | 6,32 | — | — |

Для ртути:

$$\gamma_t = \frac{\gamma_0}{1 + 0,0001815 \cdot t},$$

где γ_0 — удельный вес ртути при 0°C .

СЖИМАЕМОСТЬ КАПЕЛЬНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Сжимаемость характеризуется коэффициентом объемного сжатия $\beta_v \left[\frac{\text{см}^2}{\text{кг}} \right]$, который выражает относительное изменение объема V при увеличении давления p на 1 кг/см^2 .

Коэффициент объемного сжатия для капельных жидкостей весьма незначителен; значения его для некоторых жидкостей приведены в табл. 9.

Таблица 9
Значение коэффициента объемного сжатия для капельных жидкостей

| Жидкость | β_v |
|----------|--|
| Вода | $0,0000525 \div 0,0000475 \approx \frac{1}{20\,000}$ |
| Алкоголь | 0,000077 |
| Эфир | 0,000110 |
| Ртуть | 0,000003 |
| Бензин | 0,000092 |
| Глицерин | 0,000025 |

Модуль упругости — величина, обратная коэффициенту объемного сжатия:

$$E_v = \frac{1}{\beta_v} \left[\frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right].$$

В табл. 10 приведены значения модуля упругости воды в зависимости от давления и температуры.

Таблица 10

Значение модуля упругости воды $E_v = \frac{1}{\beta_v} \text{ кг/см}^2$

| $t, ^\circ\text{C}$ | Давление p в кг/см^2 | | | | |
|---------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 |
| 0 | 18 900 | 19 000 | 19 200 | 19 500 | 19 800 |
| 5 | 19 300 | 19 500 | 19 700 | 20 100 | 20 700 |
| 10 | 19 500 | 19 700 | 20 100 | 20 500 | 21 200 |
| 15 | 19 700 | 20 000 | 20 300 | 20 900 | 21 700 |
| 20 | 19 800 | 20 200 | 20 600 | 21 200 | 22 100 |

ВЯЗКОСТЬ

Под вязкостью подразумевают свойство жидкости, в силу которого при перемещении одного слоя жидкости по другому в ней возникают силы внутреннего трения.

Сила внутреннего трения F по Ньютону определяется уравнением

$$F = -\mu \cdot \omega \left(\frac{dv}{dy} \right)_n,$$

где ω — величина трущихся поверхностей;

$\left(\frac{dv}{dy} \right)_n$ — градиент относительной скорости перемещения одного слоя жидкости по другому в направлении, нормальном к движущимся слоям;

μ — некоторый коэффициент, зависящий от физических свойств жидкости, — коэффициент абсолютной вязкости.

В системе CGS:

$$\mu = [г \cdot см^{-1} \cdot сек^{-1}] \text{ (пуаз)}.$$

Коэффициент ν , равный

$$\nu = \frac{\mu}{\rho},$$

называется кинематическим коэффициентом вязкости.

В системе CGS:

$$\nu = [см^2/сек] \text{ (стокс)}.$$

В технике вязкость измеряют при помощи особых приборов — вискозиметров и характеризуют обычно относительными величинами по отношению к воде, например в градусах Энглера, Сейболта и др. Для перевода градусов Энглера E в единицы кинематической

вязкости можно пользоваться формулой:

$$10^6 \cdot \nu = 7,31 E - \frac{6,31}{E} \text{ м}^2/\text{сек}$$

или

$$10^6 \cdot \nu = E \cdot 7,60 \left(1 - \frac{1}{E^3} \right) \text{ м}^2/\text{сек}.$$

В табл. 11 даны основные данные вискозиметров различных систем и переводные формулы от условных единиц к кинематическому коэффициенту вязкости в $см^2/сек$.

Вязкость изменяется в зависимости от температуры и давления. Для воды кинематический коэффициент вязкости при различных температурах может быть определен по формуле:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 t + 0,000221 t^2} \cdot \frac{см^2}{сек}.$$

В табл. 12 даны значения коэффициента μ для воды.

Таблица 12

Коэффициент вязкости воды μ (в сантипуазах)

| Температура в °C | μ | Температура в °C | μ | Температура в °C | μ | Температура в °C | μ |
|------------------|--------|------------------|--------|------------------|--------|------------------|--------|
| 0 | 1,7921 | 25 | 0,8937 | 50 | 0,5494 | 75 | 0,3799 |
| 5 | 1,5188 | 30 | 0,8007 | 55 | 0,5064 | 80 | 0,3565 |
| 10 | 1,3077 | 35 | 0,7225 | 60 | 0,4688 | 85 | 0,3355 |
| 15 | 1,1404 | 40 | 0,6560 | 65 | 0,4355 | 90 | 0,3165 |
| 20 | 1,0050 | 45 | 0,5988 | 70 | 0,4061 | 95 | 0,2994 |

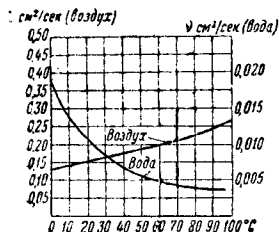
Таблица 11

Основные данные вискозиметров различных систем

| Наименование условной единицы | Условное обозначение | Страны, в которых распространены | Объем испытуемой жидкости, подлежащей измерению, в $см^3$ | Выражение для условной единицы (T — время истечения испытуемой жидкости в сек., T_s — то же воды, T_p — то же рапсового масла) | Константа прибора в сек. | Формулы перевода условной единицы в кинематический коэффициент вязкости в $см^2/сек$ |
|-------------------------------|----------------------|----------------------------------|---|---|--------------------------|--|
| Градусы Энглера | °E | СССР, Германия | 200 | $°E = \frac{T \text{ при } t^\circ C}{T_s \text{ при } t=20^\circ C}$ | $T_s = 50-53$ | $\nu = 0,0731 °E - \frac{0,0631}{°E}$ |
| Секунды Энглера | 'E | То же | 200 | $'E = T \text{ при } t^\circ C$ | 51 | $\nu = 0,001435 'E - \frac{3,22}{'E}$ |
| Секунды Сейболта Универсаль | 'S | США | 60 | $'S = T \text{ при } t^\circ F$ | — | $\nu = 0,0022 'S - \frac{1,8}{'S}$ |
| Секунды Сейболта Фуrol | SF' | То же | 60 | $SF' = T \text{ при } t^\circ F$ | — | $\nu = 0,022 '(SF) - \frac{2,03}{(SF)}$ |
| Секунды Редвуда Торгового | R' | Англия | 50 | $R' = \frac{100\rho}{915} \cdot \frac{T \text{ при } t^\circ F}{T_p \text{ при } t=60^\circ F}$ | $T_p = 555$ | $\nu = 0,026 'R - \frac{1,72}{'R}$ |
| Секунды Редвуда Адмиралти | RA' | США | 50 | $RA' = T \text{ при } 32^\circ F$ | — | $\nu = 0,0239 '(RA) - \frac{0,403}{(RA)}$ |
| Градусы Барбье | °B | Франция | $см^3$ в час | $°B = \text{число } см^3 \text{ в час}$ | — | $\nu = \frac{48,5}{°B}$ |

На фиг. 1 показана кривая зависимости кинематического коэффициента вязкости воды и воздуха от температуры.

В капельных жидкостях кинематический коэффициент вязкости уменьшается с повышением температуры, в газах — увеличивается.



Фиг. 1

температуры определяется по формуле

$$\lg \lg (\nu + 0,08) = A + b \cdot \lg T,$$

где ν — кинематическая вязкость в сантистоксах ($\text{мм}^2/\text{сек}$);

T — абсолютная температура в $^{\circ}\text{K}$;

A и b — коэффициенты.

Для подсчёта вязкости по этой формуле необходимо знать значение вязкости при каких-либо двух температурах. На фиг. 2 приведён график, облегчающий производство подсчётов. Для получения вискограммы через две известные точки проводят прямую линию.

С увеличением давления вязкость капельной жидкости возрастает, но значительно меньше, чем от температуры, — в среднем на $1/300 - 1/500$ своей величины при увеличении давления на 1 кг/см^2 .

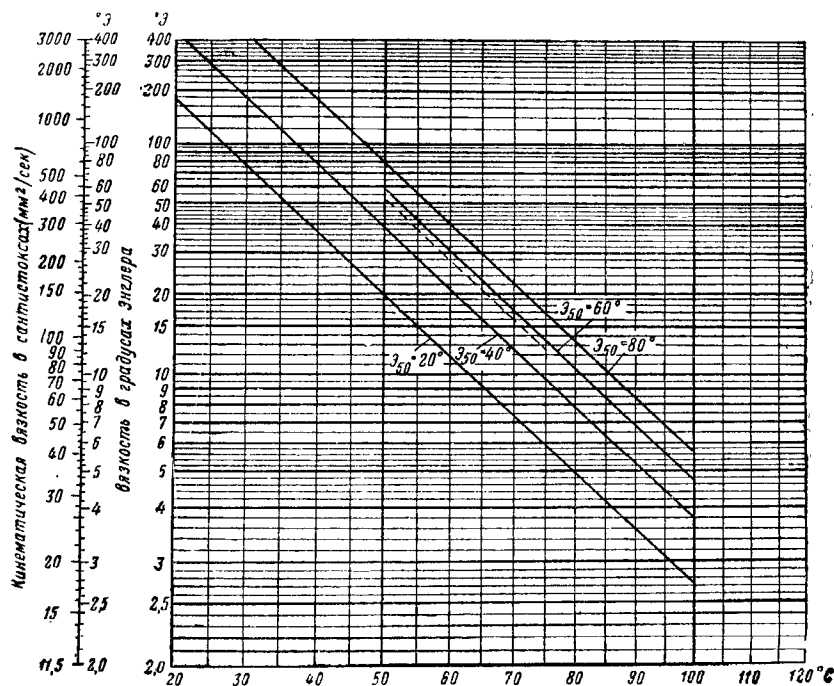
Таблица 13

Абсолютная вязкость некоторых жидкостей в зависимости от температуры

| Вещество | Температура в $^{\circ}\text{C}$ | Вязкость в пуазах |
|---------------------|----------------------------------|-------------------|
| Бензол | 0 | 0,00972 |
| | 20 | 0,00652 |
| | 80 | 0,00329 |
| Глицерин 100% . . . | 0 | 121,0 |
| | 30 | 6,29 |
| » 86% . . . | 18 | 0,971 |
| » 42% . . . | 18 | 0,043 |
| Касторовое масло . | 1,8 | 51,8 |
| | 17,5 | 12,25 |
| | 50 | 1,22 |
| Метилвый спирт . | -98,7 | 0,1387 |
| | 0 | 0,00821 |
| | 20 | 0,00597 |
| Ртуть | -20 | 0,01855 |
| | 20 | 0,01554 |
| | 340 | 0,00921 |
| Серная кислота 100% | 0 | 0,484 |
| | 76,5 | 0,00518 |
| Толуол | 15 | 0,00623 |
| | 60 | 0,00387 |
| Углекислота | 5 | 0,003925 |
| | 20 | 0,000812 |
| | 29 | 0,000539 |
| Уксусная кислота . | 15 | 0,01410 |
| | 76,5 | 0,00563 |
| Этиловый спирт . . | 0 | 0,0177 |
| | 75 | 0,00471 |
| | 150 | 0,00166 |
| Масло льняное . . . | 20 | 0,516 |
| | 50 | 0,182 |
| | 80 | 0,082 |

Абсолютная вязкость газов может определяться по формуле

$$\mu_t = \mu_0 \frac{1 + \frac{C}{273}}{1 + \frac{C}{T}} \sqrt{\frac{T}{273}},$$



Фиг. 2

где μ_0 — вязкость при 0°C ;

T — абсолютная температура в $^\circ\text{K}$;

C — постоянная.

В табл. 14 даны значения вязкости некоторых газов.

Таблица 14

Абсолютная вязкость некоторых газов при 0°C

| Название газа | C | $10^6 \mu_0$ в $\text{кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$ |
|--------------------------|-----|--|
| Воздух | 120 | 1,755 |
| Азот | 107 | 1,703 |
| Кислород | 138 | 1,262 |
| Углекислый газ | 150 | 1,402 |
| Оксиг углерода | 102 | 1,687 |
| Метан | 198 | 1,657 |
| Водород | 83 | 0,85 |
| Гелий | 80 | 1,88 |
| Аммиак | 626 | 0,96 |
| Ацетилен | 198 | 1,02 |
| Хлор | 531 | 1,29 |
| Водяной пар | 673 | 0,87 |

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ И КАПИЛЛЯРНОСТЬ

Поверхностным натяжением называется свойство жидкости сокращать свою свободную поверхность до наименьших размеров. Силы поверхностного натяжения характеризуются коэффициентом поверхностного натяжения α , численно равным силе, с которой действует по линии раздела на единицу длины одна часть поверхностного слоя на другую. Коэффициент α определяется экспериментально и в зависимости от температуры изменяется следующим образом:

$$\alpha = \alpha_0 - \beta t \quad [\text{кг}/\text{м}] \text{ или } [\text{дин}/\text{см}],$$

где α_0 — коэффициент поверхностного натяжения при $t = 0^\circ\text{C}$.

Поверхностное натяжение обуславливает дополнительное давление

$$p = \alpha \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right),$$

где r_1 и r_2 — главные радиусы кривизны рассматриваемого элемента поверхности.

Дополнительное давление обуславливает в свою очередь поднятие или опускание уровня жидкости по отношению к нормальному уровню. Высота поднятия жидкости в капилляре равна

$$h = \frac{4 \alpha \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot d},$$

где φ — угол соприкосновения жидкости со стенкой;

d — диаметр капилляра;

γ — удельный вес жидкости.

В табл. 15 и 16 приведены величины коэффициента поверхностного натяжения воды и других жидкостей при различных температурах.

Таблица 15

Поверхностное натяжение воды при различных температурах (во влажном воздухе и давлении 750 мм рт. ст.)

| Температура в $^\circ\text{C}$ | α дин/см | Температура в $^\circ\text{C}$ | α дин/см | Температура в $^\circ\text{C}$ | α дин/см |
|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| 0 | 75,49 | 25 | 71,78 | 50 | 67,8 |
| 5 | 74,75 | 30 | 71,03 | 55 | 66,9 |
| 10 | 74,01 | 35 | 70,29 | 60 | 66,0 |
| 15 | 73,26 | 40 | 69,54 | 65 | 65,1 |
| 20 | 72,53 | 45 | 68,6 | 70 | 64,2 |

Таблица 16

Поверхностное натяжение жидкостей по отношению к воздуху

| Вещество | Температура в $^\circ\text{C}$ | α дин/см |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| Едкий натр 35% | 20 | 99,7 |
| Серная кислота 98,7% | 18 | 53,66 |
| Соляная кислота 25% | 20 | 70,74 |
| Бензол | 17,5 | 29,16 |
| Глицерин | 18 | 64,7 |
| Керосин | 20 | 23,96 |
| Нефть | 18 | 23,6 |
| Олифа | 20 | 32,0 |
| Спирт этиловый | 35 | 20,6 |
| Эфир серный | 25,3 | 16,7 |

ГИДРОСТАТИКА

ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ, ЕГО ИЗМЕРЕНИЕ И СВОЙСТВА

Если жидкость, находящуюся в покое, рассечь некоторой плоскостью, выделить на ней элементарную площадку ω и суммарное давление на неё со стороны отброшенной части жидкости обозначить через P , то $\frac{P}{\omega}$ называется средним гидростатическим давлением (напряжением) жидкости — p_{cp} .

Если площадку ω уменьшать до нуля, то предел, к которому стремится среднее гидро-

статическое давление p_{cp} , называется гидростатическим давлением (напряжением) p в данной точке:

$$p = \lim_{\omega \rightarrow 0} \left(\frac{P}{\omega} \right) = \frac{dP}{d\omega}.$$

Гидростатическое давление измеряется в технических атмосферах и пьезах:

$$\begin{aligned} 1 \text{ ат} &= 1 \text{ кг}/\text{см}^2 = 10\,000 \text{ кг}/\text{м}^2; \\ 1 \text{ пз} &= 1 \text{ стем}/\text{м}^2 = 101,97 \text{ кг}/\text{м}^2 = \\ &= 0,010197 \text{ кг}/\text{см}^2. \end{aligned}$$

¹ По отношению к азоту.

Свойства гидростатического давления (напряжения):

а) гидростатическое давление направлено по внутренней нормали к площадке действия;

б) гидростатическое давление в точке не зависит от направления, в котором оно рассматривается.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ГИДРОСТАТИКИ ЭЙЛЕРА

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= -\rho X \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= -\rho Y \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= -\rho Z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где X, Y, Z — проекции на оси координат равнодействующей сил, действующих на единицу массы жидкости;
 ρ — плотность жидкости.

Из уравнений (1) путём умножения их соответственно на dx, dy, dz и сложения получается основное уравнение гидростатики:

$$dp = \rho (X \cdot dx + Y \cdot dy + Z \cdot dz). \quad (2)$$

Интеграл его даёт величину и распределение давления в каждом конкретном случае.

ПОВЕРХНОСТИ УРОВНЯ

Уравнение поверхности равного давления или поверхности уровня получается из уравнения (2), если в нём положить $dp = 0$:

$$X \cdot dx + Y \cdot dy + Z \cdot dz = 0. \quad (3)$$

Левая часть этого уравнения представляет элементарную работу массовых сил на возможном перемещении, т. е. в данном случае на направлении поверхности равного давления.

Из уравнения (3) следует, что элементарная работа массовых сил вдоль поверхности равного давления равна нулю. Последнее же возможно лишь в том случае, если суммарное ускорение массовых сил перпендикулярно элементу поверхности равного давления.

РАВНОВЕСИЕ ЖИДКОСТИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Если оси координат взяты, как показано на фиг. 3, то уравнение (2) принимает вид:

$$dp = -\rho \cdot g dz = -\gamma \cdot dz$$

или

$$d \left(z + \frac{p}{\gamma} \right) = 0,$$

откуда

$$z + \frac{p}{\gamma} = \text{const} = C, \quad (4)$$

где g — ускорение силы тяжести.

Зная ординату какой-нибудь точки a — Z_a и гидростатическое давление в ней — p_a , найдём постоянную

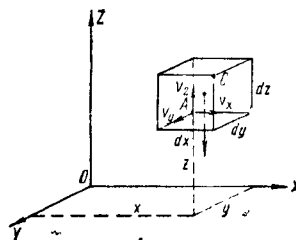
$$C = Z_a + \frac{p_a}{\gamma}.$$

Уравнение (4) тогда перейдёт в уравнение

$$z + \frac{p}{\gamma} = Z_a + \frac{p_a}{\gamma}. \quad (5)$$

Разность между давлением в данной точке, если оно больше атмосферного, и атмосферным давлением называется избыточным давлением:

$$p_{из} = p_a - p_{атм}.$$



Фиг. 3

Разность между атмосферным давлением и давлением в данной точке, если оно меньше атмосферного, называется вакуумом:

$$p_{вак} = p_{атм} - p_a.$$

Если Z_a — вертикальная координата точки, то величина давления в ней из уравнения (5) будет:

$$p_s = (p_a \pm \gamma \cdot h), \quad (6)$$

где $h = (Z_s - Z_a)$ — глубина погружения одной точки под другой.

Для избыточного давления

$$p_{сиз} = (p_{сатм} \pm \gamma h).$$

Если $p_{сиз} = 0$, т. е. точка взята на свободной поверхности, где $p = p_{атм}$, то

$$p_{сиз} = \pm \gamma h.$$

ЗАКОН ПАСКАЛЯ

Уравнение (6) является математическим выражением закона Паскаля: внешнее давление, оказываемое на поверхность жидкости, передаётся без изменения всем частицам жидкости.

Величины z и $\frac{p}{\gamma}$ в уравнении (5) называются соответственно геометрическим и пьезометрическим напорам.

Сумма $z + \frac{p}{\gamma} = H$ — величина постоянная для всех точек покоящейся жидкости, называется гидростатическим напором.

РАВНОВЕСИЕ ЖИДКОСТИ В СООБЩАЮЩИХСЯ СОСУДАХ

1. Открытые сообщающиеся сосуды заполнены однородной жидкостью. В этом случае:

$$Z_1 = Z_2,$$

т. е. жидкости расположены на одинаковом уровне.

2. Один из сосудов закрыт (давление в нём p_0). Тогда:

$$\frac{p_0 - p_a}{\gamma} = Z_2 - Z_1,$$

т. е. разность высот уровней в сосудах равна разности пьезометрических высот.

3. Оба сосуда открыты и заполнены несмешивающимися жидкостями с удельным весом γ_1 и γ_2 . При этом:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1},$$

т. е. высоты жидкостей, отсчитываемые от поверхности раздела, обратно пропорциональны удельным весам.

ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ПОКОЙ ЖИДКОСТИ

Относительный покой жидкости — покой относительно движущихся сосудов, в которых эта жидкость находится. В этих случаях применяют принцип Даламбера и к силам тяжести присоединяют силы инерции переносного движения, т. е. движения сосуда.

1. Сосуд с жидкостью вращается с некоторой угловой скоростью ω . Пусть ось z — ось вращения; начало координат на свободной поверхности (фиг. 4), где $p = p_0$, $r = 0$ и $z = 0$.

Интегрирование уравнения (2) даёт выражение

$$p = p_0 + \gamma \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2g} + \gamma z, \quad (7)$$

справедливое для всех точек рассматриваемой жидкости.

Уравнением поверхности уровня ($dp = 0$) будет:

$$-z = \frac{\omega^2}{2g} r^2 + C, \quad (8)$$

т. е. поверхностью уровня будет параболоид вращения.

Для свободной поверхности

$$-z_0 = \frac{\omega^2}{2g} r^2,$$

где z_0 — превышение точек свободной поверхности над плоскостью XOY .

Имея в виду последнее уравнение, можно представить уравнение (7) в следующем виде:

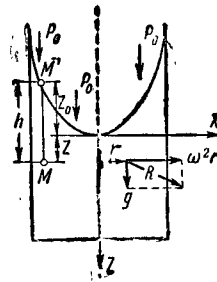
$$p = p_0 + \gamma (z - z_0) = p_0 + \gamma h,$$

т. е. закон распределения давления в жидкости, находящейся во вращающемся сосуде, тот же, что и в покоящейся жидкости.

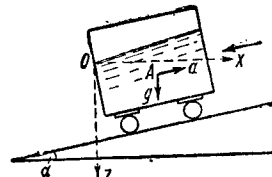
2. Сосуд с жидкостью движется с поступательным ускорением a (железнодорожный вагон-цистерна).

Если оси координат расположены так, как показано на фиг. 5, то:

$$p = p_0 + a [a \cdot \cos \alpha \cdot x + (g - a \cdot \sin \alpha) z]. \quad (9)$$



Фиг. 4



Фиг. 5

Свободная поверхность определяется уравнением

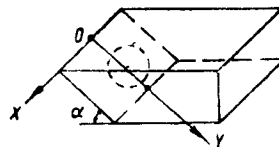
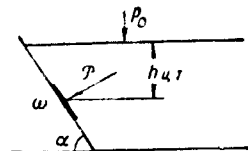
$$-z = \frac{a \cdot \cos \alpha}{g - a \cdot \sin \alpha} x, \quad (10)$$

т. е. представляет собой плоскость, наклонённую к горизонту под углом β , тангенс которого

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{a \cdot \cos \alpha}{g - a \cdot \sin \alpha}. \quad (11)$$

ДАВЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ НА ПЛОСКИЕ СТЕНКИ

1. В силу первого свойства гидростатического давления равнодействующая сил давления P направлена нормально к стенке.



Фиг. 6

2. Сила давления жидкости на плоскую стенку равна произведению смоченной площади этой стенки на величину гидростатического давления в центре тяжести этой площади (фиг. 6):

$$P = (p_0 + \gamma \cdot h_{ц.т.}) \omega. \quad (12)$$

Для избыточного давления формула будет иметь вид:

$$p_{из} = \gamma h_{ц.м} \omega, \quad (13)$$

где $h_{ц.м}$ — глубина погружения центра тяжести смоченной площади стенки под уровнем жидкости;
 p_0 — давление на свободной поверхности жидкости;
 ω — величина смоченной площади.

Из формулы (12) вытекает, что величина силы давления жидкости на дно резервуара зависит от рода жидкости, площади дна и глубины погружения его центра тяжести и не зависит от формы сосуда (гидростатический парадокс).

3. Точка приложения равнодействующей сил давления называется центром давления.

Координаты центра избыточного давления определяются уравнениями (оси взяты так, как показано на фиг. 6):

$$x = \frac{I_{xy}}{y_{ц.м} \cdot \omega}; \quad y = y_{ц.м} + \frac{I'_x}{y_{ц.м} \cdot \omega}, \quad (14)$$

где I_{xy} — центробежный момент инерции смоченной площади относительно осей x и y ;

I'_x — момент инерции смоченной площади относительно оси, параллельной оси xx и проходящей через центр тяжести площади.

Для плоской стенки, симметричной относительно оси oy , $I_{xy} = 0$ и $x = 0$, т. е. центр давления лежит на оси симметрии.

Формулы для вычисления избыточного давления и координат центра давления для различных плоских фигур приведены в табл. 17.

Расчёт давления жидкости на плоские стенки с помощью эпюр давления. Формулы (12) и (13) можно представить в следующем виде:

$$\frac{P}{\omega} = p_0 + \gamma \cdot h_{ц.м};$$

$$\frac{P_{из}}{\omega} = \gamma \cdot h_{ц.м}.$$

В соответствии с этим эпюра полного давления будет иметь вид трапеции, а эпюра избыточного давления — форму треугольника. Величина силы давления, приходящейся на единицу длины стенки, соответственно равна площади трапеции или треугольника. Ордината центра давления равна ординате центра тяжести площади эпюры.

ДАВЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ НА КРИВОЛИНЕЙНЫЕ СТЕНКИ

В общем случае для определения силы давления P достаточно вычислить её проекции на три оси координат. Величина силы P определяется как диагональ прямоугольного параллелепипеда, рёбра которого P_x , P_y , P_z (фиг. 7):

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}, \quad (15)$$

P_x и P_y — горизонтальные составляющие вектора давления на криволинейную поверхность; они равны давлению жидкости на проекции криволинейной поверхности на вертикальные плоскости и направлены в сторону стенки:

$$P_x = \gamma \int z \cdot d\omega_{yz}; \quad P_y = \gamma \int z \cdot d\omega_{xz}; \quad (16)$$

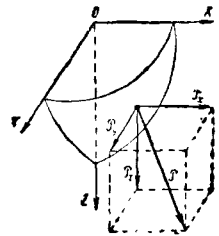
P_z — вертикальная составляющая вектора давления жидкости на криволинейную поверхность, равная весу жидкости в объёме, ограниченном рассматриваемой криволинейной поверхностью и плоскостями YOZ и ZOX :

$$P_z = \gamma \int z \cdot d\omega_{xy}. \quad (17)$$

Здесь ω_{yz} , ω_{xz} , ω_{xy} — проекции смоченной площади на соответствующую координатную плоскость.

Направление силы P определяется косинусами направляющих углов:

$$\left. \begin{aligned} \cos(\hat{P}, x) &= \frac{P_x}{P} \\ \cos(\hat{P}, y) &= \frac{P_y}{P} \\ \cos(\hat{P}, z) &= \frac{P_z}{P} \end{aligned} \right\} \cdot (18)$$



Фиг. 7

ПЛАВАНИЕ ТЕЛ

Тело, погруженное в жидкость, испытывает давление, направленное снизу вверх, равное весу жидкости, вытесненной телом (закон Архимеда):

$$P = \gamma \cdot V, \quad (19)$$

где V — объём погруженной части тела;

γ — удельный вес жидкости.

Задачи о плавании тел сводятся к определению: пловучести тела, погруженного в жидкость, и способности плавающего тела восстанавливать после крена своё первоначальное положение (стойчивость тела).

Пловучесть тел. Если вес погруженной части тела $G < P$, то тело всплывает; при $G > P$ тело тонет; при $G = P$ тело плавает.

Вес жидкости в погруженном объёме тела называется водоизмещением. Плоскость сечения судна свободной поверхностью жидкости называется плоскостью плавания, а линия сечения — ватерлинией. Ось плавания — вертикальная прямая, нормальная к плоскости плавания и проходящая через центр тяжести тела. На оси плавания расположены три характерные точки (фиг. 8): 1) центр тяжести тела C ; 2) центр водоизмещения D — точка приложения результирующей давления жидкости на тело; 3) метацентр M — точка пересечения оси плавания с равнодействующей сил давления жидкости на плавающее тело при крене.

Таблица 17

Сила давления жидкости и координаты центра давления для различных плоских фигур

| Схема | Наименование фигуры | Площадь фигуры | Глубина погружения центра тя- жести $l_{ц.т}$ | Сила давления жидкости на фигуру | Глубина погружения центра давления |
|-------|-------------------------------|-----------------------|--|--|--|
| | Прямоу- ольник | bL | $\frac{L}{2}$ | $\gamma bL \left(c + \frac{L}{2} \right)$ | $c + \frac{L}{3} \cdot \frac{2L+3c}{L+3c}$ |
| | Прямоугольник | bL | $\frac{L}{2}$ | $\frac{1}{2} \gamma bL^2$ | $\frac{2}{3} L$ |
| | Квадрат | b^2 | $\frac{1}{2} b \sqrt{\frac{1}{2}}$ | $\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma b^2$ | $\frac{1}{12} \sqrt{\frac{1}{2}} b$ |
| | Равнобедренный треугольник | $\frac{1}{2} BL$ | $\frac{L}{3}$ | $\frac{1}{6} \gamma BL^2$ | $\frac{1}{2} L$ |
| | Трапеция | $\frac{1}{2} L (B+b)$ | $\frac{L}{3} \cdot \frac{2b+B}{b+B}$ | $\frac{1}{6} \gamma L^2 (2b+B)$ | $\frac{1}{2} L \cdot \frac{3b+B}{2b+B}$ |
| | Круг | πr^2 | $c+r$ | $\pi \gamma r^2 (r+c)$ | $c+r + \frac{r^3}{4(r+c)}$ |
| | Полукруг | $\frac{1}{2} \pi r^2$ | $\frac{4}{3} \cdot \frac{r}{\pi}$ | $\frac{2}{3} \gamma r^2$ | $\frac{3}{16} \pi r$ |
| | Эллипс | πab | $a+c$ | $\gamma \pi a b (a+c)$ | $a+c + \frac{a^2}{4(a+c)}$ |
| | Парабола | $\frac{2}{3} aL$ | $\frac{2}{5} L$ | $\frac{4}{15} \gamma aL^2$ | $\frac{4}{7} L$ |

Для равновесия плавающего тела необходимо, чтобы центр тяжести и центр водоизмещения лежали на одной вертикали. Расстояние от метacentра до центра тяжести плавающего тела называется метacentрической высотой — m .

Расстояние между метacentром и центром водоизмещения называется метacentрическим радиусом ρ :

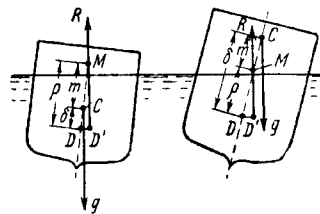
$$\rho = \frac{I_0}{V}, \quad (20)$$

где I_0 — момент инерции плоскости плавания относительно продольной оси плавания;

V — водоизмещение судна.

Остойчивость плавающих тел. Положение судна устойчиво, если пара сил — вес судна G и результирующая R сил, действующих

со стороны жидкости, — стремится уничтожить крен (фиг. 8). Из чертежа следует, что для остойчивости плавающего тела необходимо,



Фиг. 8

чтобы расстояние δ между центром тяжести и центром водоизмещения было меньше длины метacentрического радиуса ρ .

ГИДРОДИНАМИКА ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

МЕТОДЫ ЛАГРАНЖА И ЭЙЛЕРА

Изучение движения жидкости можно проводить двумя различными методами. Можно, начиная с некоторого начального момента, проследить за движением отдельных частиц жидкости, определив для них траекторию движения; скорость и гидродинамическое давление (метод Лагранжа).

Если a, b, c — координаты выбранной частицы в начальный момент, то координаты x, y, z в произвольный момент времени t будут определяться по методу Лагранжа уравнениями

$$\left. \begin{aligned} x &= f_1(a, b, c, t) \\ y &= f_2(a, b, c, t) \\ z &= f_3(a, b, c, t) \end{aligned} \right\}. \quad (21)$$

По методу Эйлера в определённый момент определяется движение всех частиц жидкости данной области относительно выбранной системы координат.

Уравнения (21), решённые относительно a, b, c , выражают движение жидкости по методу Эйлера:

$$\left. \begin{aligned} a &= F_1(x, y, z, t) \\ b &= F_2(x, y, z, t) \\ c &= F_3(x, y, z, t) \end{aligned} \right\}. \quad (22)$$

В этих уравнениях x, y, z — координаты неподвижной точки пространства, по которым определяется, какие частицы жидкости проходят через эту неподвижную точку пространства с течением времени.

Метод Эйлера практически более удобен, ибо даёт общую картину распределения скорости и давления в любой точке пространства, тогда как уравнения Лагранжа исследуют движение отдельных частиц жидкости.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ИДЕАЛЬНОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ЭЙЛЕРА

Уравнения Эйлера имеют вид:

$$X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dv_x}{dt}; \quad (23)$$

$$Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{dv_y}{dt}; \quad (24)$$

$$Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{dv_z}{dt}. \quad (25)$$

или иначе:

$$\left. \begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \\ &+ v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + \\ &+ v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + \\ &+ v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{aligned} \right\}. \quad (26)$$

Вместе с уравнением неразрывности несжимаемой жидкости

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (27)$$

эти уравнения дают полную систему уравнений с четырьмя неизвестными.

Интегрирование вышеуказанных дифференциальных уравнений представляет значительные трудности и выполнено лишь для некоторых частных случаев.

ОСНОВНАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

Установившееся движение — движение, при котором гидродинамические параметры жидкости в каждой точке занятого ею пространства остаются неизменными с течением времени, т. е.

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial v_y}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial v_z}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial t} = 0.$$

Уравнения установившегося движения в форме Эйлера имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Осреднённая местная скорость. Установившееся движение в полном смысле данного выше определения встречается очень редко. Часто имеет место движение, при котором постоянен вектор так называемой осреднённой местной скорости, вычисляемый по формуле

$$\bar{v}_{cp} = \frac{\int_0^T \bar{v}_i \cdot dt}{T} \quad (29)$$

Таким образом осреднённая местная скорость есть средняя скорость в данной точке, определяемая за достаточный промежуток времени T .

Живое сечение — поверхность, проведенная в пределах потока жидкости, нормальная в каждой своей точке к осреднённой местной скорости в этой точке; в частном случае плавно изменяющегося движения — плоскость, проведенная в пределах потока и нормальная к направлению движения.

Плавно изменяющееся движение — неравномерное движение, характеризующееся плавностью изменений живых сечений и направления потока, при которых живые сечения практически можно считать плоскими.

Уравнения движения для этого случая в форме Эйлера имеют вид (ось x совпадает с направлением вектора скорости):

$$\left. \begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{dv_x}{dt} \\ Y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \\ Z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

В частном случае, когда движение жидкости будет установившимся и плавно изменяющимся, система уравнений (30) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Расход — объём жидкости, протекающей через поперечное сечение потока в единицу времени:

$$Q = \omega \cdot v. \quad (32)$$

Расход равен произведению площади поперечного сечения ω на среднюю скорость течения жидкости v .

Условие неразрывности в конечной форме может быть представлено уравнением постоянства расхода

$$Q = \text{const.} \quad (33)$$

Линия тока — линия, в каждой точке которой в данный момент вектор скорости жидкости к ней касателен. В случае установившегося движения линия тока является траекторией лежащих на ней частиц жидкости.

Дифференциальные уравнения линии тока:

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y} = \frac{dz}{v_z}. \quad (34)$$

Поверхность тока — поверхность, в каждой точке которой в данный момент вектор скорости жидкости к ней касателен.

Элементарная трубка тока (струйка) — часть жидкости, ограниченная линиями тока, проведенными через все точки любого бесконечно малого простого замкнутого контура, находящегося в области, занятой жидкостью.

Плоскопараллельное движение (плоское движение) — движение, при котором частицы жидкости движутся параллельно некоторой неподвижной плоскости со скоростями, не зависящими от расстояния частиц до этой плоскости.

Для движения в плоскости XOY уравнения Эйлера примут вид:

$$\left. \begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \end{aligned} \right\}; \quad (35)$$

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0; \quad (36)$$

уравнение линии тока:

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y} \text{ или } v_x \cdot dy = v_y \cdot dx. \quad (37)$$

Функция тока. В плоскопараллельном движении несжимаемой жидкости функция ψ (переменные Эйлера), связанная с составляющими скорости следующими зависимостями:

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (38)$$

называется функцией тока.

Абсолютная величина числового значения этой функции в любой точке равна расходу между линией тока, проходящей через эту точку, и линией тока, с $\psi = 0$.

Уравнения линий тока могут быть записаны через функцию тока:

$$-\frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} dy = 0, \quad (39)$$

или

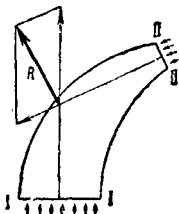
$$d\psi = 0,$$

или

$$\psi = \text{const.}$$

ЗАКОН КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ

Имея в виду математическое выражение закона количества движения



Фиг. 9

$$\frac{d}{dt} (\Sigma m v) = \Sigma P$$

в приложении к случаю установившегося движения жидкого тела (фиг. 9), можно записать:

$$\frac{\gamma}{g} (\omega_2 \cdot v_2^2 - \omega_1 \cdot v_1^2) = p_1 \omega_1 - p_2 \omega_2 + R', \quad (40)$$

где $R' = -R$ — реакция стенок канала; индексы 1 и 2 относятся соответственно к сечениям I и II.

ЗАКОН ЖИВОЙ СИЛЫ (уравнение энергии)

Математическое выражение закона живой силы для жидкого тела имеет вид:

$$X dx + Y dy + Z dz - \frac{1}{\rho} \left(dp - \frac{\partial p}{\partial t} dt \right) = d \frac{v^2}{2}. \quad (41)$$

Для установившегося движения $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$; тогда

$$X dx + Y dy + Z dz - \frac{dp}{\rho} = d \frac{v^2}{2}. \quad (42)$$

Если объёмные силы, компоненты которых на оси координат x, y, z входят в это

уравнение, будут иметь потенциал, как это в большинстве случаев имеет место в природе, т. е.

$$X = -\frac{\partial U}{\partial x};$$

$$Y = -\frac{\partial U}{\partial y};$$

$$Z = -\frac{\partial U}{\partial z};$$

где $U = U(x, y, z)$, то интеграл уравнения (42) будет

$$U + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \text{const.}$$

Для тяжёлой жидкости:

$$dU = g \cdot dz, \quad (X = 0, Y = 0, Z = g)$$

и, следовательно,

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} = \text{const.} \quad (43)$$

Последнее уравнение называется уравнением Даниила Бернулли и справедливо для элементарной струйки.

Интерпретация уравнения Бернулли. Для всех точек элементарной струйки сумма трёх высот — положения z , давления $\frac{p}{\gamma}$ и ско-

ростного напора $\frac{v^2}{2g}$ — есть величина постоянная.

Все члены уравнения Бернулли выражают собой энергию, несомую единицей веса жидкости, проходящей через сечения рассматриваемой струйки.

Сумма всех членов уравнения выражает суммарную, потенциальную и кинетическую энергию, отнесённую к единице веса жидкости.

ПОНЯТИЕ О ВИХРЕ

Вихревое движение — движение жидкости с угловыми скоростями, не равными нулю.

По теории Коши—Гельмгольца, скорость перемещения любой точки жидкой частицы в общем виде складывается из трёх скоростей: поступательной, деформационной и вращательной:

$$\left. \begin{aligned} v_{x(c)} &= v_x + \left[\frac{\partial v_x}{\partial x} dx + (\theta_y dz + \theta_z dy) \right] + \\ &\quad + (\omega_y dz - \omega_z dy) \\ v_{y(c)} &= v_y + \left[\frac{\partial v_y}{\partial y} dy + (\theta_z dx + \theta_x dz) \right] + \\ &\quad + (\omega_z dx - \omega_x dz) \\ v_{z(c)} &= v_z + \left[\frac{\partial v_z}{\partial z} dz + (\theta_x dy + \theta_y dx) \right] + \\ &\quad + (\omega_x dy - \omega_y dx) \end{aligned} \right\}, \quad (44)$$

где: 1) v_x, v_y, v_z — компоненты скорости движения точки $A(x, y, z)$ (фиг. 3);

2) $v_x(c), v_y(c), v_z(c)$ — компоненты скорости движения точки $C \{(x+dx), (y+dy), (z+dz)\}$:

$$3) \left. \begin{aligned} v_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \\ v_y &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \\ v_z &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (45)$$

$$4) \left. \begin{aligned} \omega_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \\ \omega_y &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \\ \omega_z &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

компоненты угловой скорости по осям координат (компоненты вихря скорости или просто компоненты вихря).

Полная угловая скорость вращения

$$\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2}. \quad (47)$$

Вектор угловой скорости в данной точке называется вихрем.

Удвоенная угловая скорость называется ротором и обозначается $\text{rot } v$:

$$\text{rot } v = 2\omega. \quad (48)$$

ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ. УРАВНЕНИЕ ЛАПЛАСА

Условием потенциального (безвихревого) движения жидкости является равенство нулю компонентов вихря:

$$\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0,$$

или, согласно формулам (46):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_z}{\partial y} &= \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} &= \frac{\partial v_x}{\partial y} \\ \frac{\partial v_x}{\partial z} &= \frac{\partial v_z}{\partial x} \end{aligned} \right\}. \quad (49)$$

Из условий (49) следует:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= -\frac{\partial \Phi(x, y, z)}{\partial x} \\ v_y &= -\frac{\partial \Phi(x, y, z)}{\partial y} \\ v_z &= -\frac{\partial \Phi(x, y, z)}{\partial z} \end{aligned} \right\}, \quad (50)$$

где функция пространства $\Phi(x, y, z)$ называется потенциалом скорости. Таким образом, движение жидкости, в котором имеется потенциал скорости, т. е. соблюдены урав-

нения (50), будет безвихревым, или потенциальным.

Компоненты скоростей потенциального потока должны удовлетворять не только условиям (50), но и уравнению неразрывности, следовательно, удовлетворять уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0, \quad (51)$$

или

$$\Delta \Phi = 0.$$

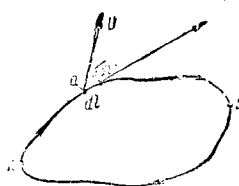
Из последнего уравнения и сравнения уравнений (38) и (50) следует, что для плоского потока функции ψ должна удовлетворять уравнению

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0. \quad (52)$$

ЦИРКУЛЯЦИЯ СКОРОСТИ. ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ. ОСОБЕННОСТЬ БЕЗВИХРЕВОГО ПОТОКА

Циркуляцией скорости называется криволинейный интеграл, взятый по какому-либо замкнутому контуру (фиг. 10):

$$\begin{aligned} \Gamma &= \oint_l v \cdot \cos(\widehat{v, dl}) dl = \\ &= \oint_l (v_x \cdot dx + v_y \cdot dy + v_z \cdot dz). \end{aligned} \quad (53)$$



Фиг. 10

Циркуляция Γ и ротор $\text{rot } v$ связаны между собой равенством:

$$\Gamma = \int dF (\text{rot } v), \quad (54)$$

где dF — элемент площади;

$\text{rot } v$ — ротор для оси, перпендикулярной dF .

Интегрирование распространяется по всей площади, ограниченной рассматриваемым контуром.

Для потенциального движения:

$$\begin{aligned} \Gamma &= \int_A^B \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} dx + \frac{\partial \Phi}{\partial y} dy + \frac{\partial \Phi}{\partial z} dz \right) = \\ &= \int_A^B d\Phi = \Phi_B - \Phi_A, \end{aligned} \quad (55)$$

где A и B (фиг. 10) — начало и конец контура.

Если потенциал скорости будет однозначной функцией координат, то

$$\Gamma = \Phi_B - \Phi_A = 0,$$

т. е. циркуляция скорости будет равна нулю.

Поверхности, выделенные в потоке жидкости, так, что все их точки имеют одинаковые функции потенциала скорости, называются поверхностями равного потенциала (эквипотенциальные поверхности).

В безвихревом потоке жидкости линии тока нормальны к поверхностям равного потенциала.

УРАВНЕНИЯ ГРОМЕКИ—ЛЕМБА

Уравнения Громеки—Лемба являются теми же уравнениями Эйлера, выраженными через компоненты вихря:

$$\left. \begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2} \right) + \\ &+ 2(v_z \omega_y - v_y \omega_z) \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v^2}{2} \right) + \\ &+ 2(v_x \omega_z - v_z \omega_x) \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v^2}{2} \right) + \\ &+ 2(v_y \omega_x - v_x \omega_y) \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

Если объёмные силы имеют потенциал, то уравнения Громеки—Лемба выглядят так:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(-U - \frac{p}{\rho} - \frac{v^2}{2} \right) &= \frac{\partial v_x}{\partial t} + \\ &+ 2(v_z \omega_y - v_y \omega_z) \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(-U - \frac{p}{\rho} - \frac{v^2}{2} \right) &= \frac{\partial v_y}{\partial t} + \\ &+ 2(v_x \omega_z - v_z \omega_x) \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(-U - \frac{p}{\rho} - \frac{v^2}{2} \right) &= \frac{\partial v_z}{\partial t} + \\ &+ 2(v_y \omega_x - v_x \omega_y) \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

ИНТЕГРАЛ ЛАГРАНЖА—КОШИ

Интеграл системы уравнений (57) для установившегося безвихревого движения — интеграл Лагранжа—Коши — имеет вид:

$$U + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} - \frac{\partial \Phi}{\partial t} = F(t), \quad (58)$$

где $\Phi(x, y, z)$ — функция потенциала скоростей;

$F(t)$ — некоторая произвольная функция времени, имеющая в каждый момент времени вполне определённую величину, одинаковую для всех точек движущейся жидкости.

Для установившегося потенциального движения интеграл Лагранжа—Коши переходит в интеграл Бернулли—Эйлера:

$$U + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \text{const},$$

справедливый, в отличие от интеграла Бернулли (43), уже не для струйки, а для всех точек жидкости.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ СЛУЧАИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Плоскопараллельный поток — потенциальный поток, имеющий в бесконечности скорость v , которую сохраняет по величине и направлению во всех точках пространства.

Если скорость v параллельна оси Ox , то

$$\Phi(x, y, z) = v_x \cdot x. \quad (59)$$

Дифференциальное уравнение линии тока

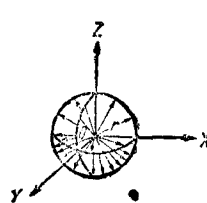
$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y},$$

но $v_y = 0$, тогда $v_x \cdot dy = 0$.

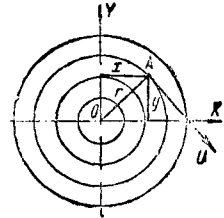
Уравнение семейства линий тока будет

$$v_x \cdot y = v \cdot y = \text{const}. \quad (60)$$

Радиальный поток. Жидкость течёт из одной точки (источника) по радиусам по всем направлениям в бесконечность (фиг. 11). Если



Фиг. 11



Фиг. 12

расход Q отрицателен, то поток называется стоком.

Скорость v на расстоянии r равна

$$v = \pm \frac{Q}{4\pi r^2}.$$

Функция потенциала скорости

$$\begin{aligned} \Phi(x, y, z) &= \pm \int_0^r \frac{Q}{4\pi r^2} dr = \\ &= \pm \frac{Q}{4\pi r} = \pm \frac{q}{r}, \end{aligned} \quad (61)$$

где $q = \frac{Q}{4\pi} = \text{const}$ — «напряжение», или эффективность, источника (стока).

При плоском движении, когда источник сосредоточен не в точке, а распределён вдоль

прямой линии, скорость v на расстоянии r будет

$$v = \pm \frac{Q}{2\pi r} = \pm \frac{q}{r},$$

где $q = \frac{Q}{2\pi}$ — эффективность источника, или стока.

Функция потенциала скоростей

$$\Phi(x, y) = \pm \frac{Q}{2\pi} \ln r = \pm q \ln r. \quad (62)$$

Циркуляционный поток. Жидкость движется по концентрическим кругам вокруг некоторой оси так, что всюду, кроме как на самой оси, она свободна от вихрей (фиг. 12).

Скорость v в точке A на расстоянии r от вихря

$$v = \frac{\Gamma}{2\pi r},$$

где Γ — циркуляция скорости вокруг оси.

Функция потенциала скоростей

$$\Phi = \frac{\Gamma}{2\pi} \arctg\left(\frac{y}{x}\right), \quad (63)$$

где $\frac{\Gamma}{2\pi} = v \cdot r$ — момент количества движения жидкости для массы, равной единице.

Функция потенциала скорости является многозначной, ибо выражается обратной круговой функцией.

МЕТОД НАЛОЖЕНИЯ (СУПЕРПОЗИЦИИ) ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ

Если n потенциальных потоков, соответственно с функциями потенциала скоростей $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$, суммировать геометрически, то суммарный поток будет также потенциальным с некоторой функцией потенциала скоростей $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n$, ибо

$$v_x = v_{x1} + v_{x2} + \dots + v_{xn}$$

или

$$v_x = \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} + \dots + \frac{\partial \Phi_n}{\partial x} = \frac{\partial (\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n)}{\partial x} = \frac{\partial \Phi}{\partial x}.$$

Аналогично:

$$v_y = \frac{\partial (\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n)}{\partial y} = \frac{\partial \Phi}{\partial y};$$

$$v_z = \frac{\partial (\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n)}{\partial z} = \frac{\partial \Phi}{\partial z}.$$

Таким образом, суммарное движение будет удовлетворять уравнению неразрывности Лагранжа:

$$\Delta \Phi = \Delta \Phi_1 + \Delta \Phi_2 + \dots + \Delta \Phi_n = 0. \quad (64)$$

Ниже приводятся некоторые частные случаи.

Источник и параллельный поток (фиг. 13). Функция потенциала скоростей, результирующего движения, равна

$$\Phi(x, z) = v \cdot x + \frac{q}{\sqrt{x^2 + z^2}}. \quad (65)$$

Жидкость, вытекающая из источника, остается внутри некоторой поверхности.

Параллельный поток как бы обтекает «полутело».

Если a — расстояние источника от передней точки тела, D — толщина тела в достаточно большом удалении от его края, то для пространственного потока

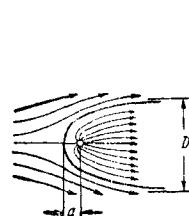
$$a = \sqrt{\frac{q}{r}} = \frac{D}{4};$$

для плоского потока

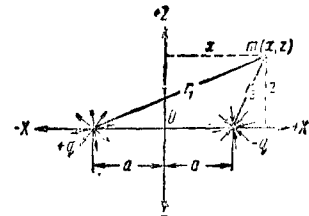
$$a = \frac{q}{v} = \frac{D}{2},$$

где q — напряжение, или эффективность, источника;

v — скорость невозмущенного параллельного потока.



Фиг. 13



Фиг. 14

Эти соотношения определяют положение и напряжение источника при заданных D и v .

Пара источник — сток (источник и сток равных напряжений) (фиг. 14). Функция потенциала скоростей

$$\Phi(x, y) = \frac{q}{r_1} - \frac{q}{r_2} = \frac{q}{\sqrt{(x+a)^2 + z^2}} - \frac{q}{\sqrt{(x-a)^2 + z^2}}. \quad (66)$$

Если уменьшить расстояние $2a$ до нуля и одновременно увеличить расход Q так, чтобы

$$a \cdot Q = M = \text{const},$$

то как предельный случай получается так называемый дублет, или диполь (фиг. 15). Величина M называется моментом диполя.

В пространственном потоке:

$$v_x = -\left(\frac{M}{4\pi r^3}\right) (3 \cos^2 \varphi - 1);$$

$$v_y = -\frac{M}{4\pi r^3} \cdot 3 \sin \varphi \cdot \cos \varphi;$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \frac{M}{4\pi r^3} \sqrt{3 \cos^2 \varphi + 1};$$

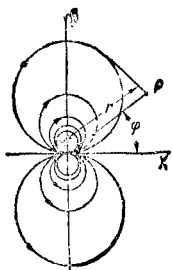
$$\Phi(x, y, z) = \frac{M}{4\pi r} \cos \varphi. \quad (67)$$

В плоском потоке:

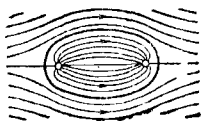
$$\begin{aligned} v_x &= -\frac{M}{2\pi r^2} (2 \cos^2 \varphi - 1); \\ v_y &= -\frac{M}{2\pi r^2} 2 \sin \varphi \cdot \cos \varphi; \\ \Phi(x, y) &= \frac{M}{2\pi r} \cos \varphi. \end{aligned} \quad (63)$$

Плоскопараллельный поток и пара источник — сток (фиг. 16). Граничная поверхность подобна эллипсоиду вращения. Для плоского потока граничная линия соответственно подобна эллипсу.

Практически важный случай: диполь и параллельный поток (фиг. 17). Граничная поверхность — сфера, для плоского потока — окружность.



Фиг. 15



Фиг. 16

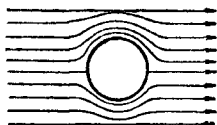
Диаметр этой фигуры d и скорость у её поверхности w : для пространственного потока (шар)

$$\left. \begin{aligned} d &= 2 \sqrt[3]{\frac{M}{2\pi v}} \\ w &= 1,5 v \sin \varphi \end{aligned} \right\}; \quad (69)$$

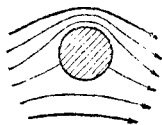
для плоского потока (круг)

$$\left. \begin{aligned} d &= 2 \sqrt{\frac{M}{2\pi v}} \\ w &= 2 v \sin \varphi \end{aligned} \right\}. \quad (70)$$

Обтекание бесконечного круглого цилиндра суммарным плоскопараллельным и циркуляционным потоком (фиг. 18). При движении плоскопараллельного потока слева направо, а циркуляционного — по часовой стрелке суммирование скоростей для верх-



Фиг. 17



Фиг. 18

ней части цилиндра даёт увеличение, а для нижней — уменьшение абсолютного значения скорости. Следовательно (по уравнению Бернулли), по сравнению с давлением в плоскопараллельном потоке давление в верхней части цилиндра будет падать, а в нижней увеличиваться.

Результирующее давление будет направлено вверх; по теории Жуковского, поддерживающая сила на единицу длины равна

$$R = \frac{\gamma}{g} \Gamma v. \quad (71)$$

ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКАЯ ФУНКЦИЯ

Зависимость между потенциалом скорости и функцией тока через компоненты скорости v_x и v_y согласно формулам (50) и (38) выражается так:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \\ v_y &= \frac{\partial \Phi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \end{aligned} \right\}. \quad (72)$$

Эти дифференциальные уравнения являются уравнениями Коши—Римана.

Известно, что вещественная и мнимая части каждой регулярной аналитической функции (т. е. имеющей непрерывную производную) $f(z)$, где $z = x + i \cdot y$, удовлетворяют уравнениям Коши—Римана, и наоборот, если функции $\Phi(x, y)$ и $\psi(x, y)$ удовлетворяют уравнениям Коши—Римана, то эти функции можно рассматривать соответственно как вещественную и мнимую части регулярной аналитической функции комплексного переменного. Таким образом, потенциал скорости и функция тока плоского движения представляют вещественную и мнимую части некоторой функции $f(z)$, называемой характеристической функцией или комплексным потенциалом:

$$f(z) = \Phi + i \psi. \quad (73)$$

Характеристическая функция имеет большое значение в изучении плоских потенциальных потоков, так как значительно упрощает их исследование.

Производная от характеристической функции

$$\frac{df(z)}{dz} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + i \frac{\partial \psi}{\partial x} = v_x + i \cdot v_y \quad (74)$$

выражает вектор, сопряжённый с вектором скорости. Эту производную называют поэтому комплексной скоростью.

Модуль комплексной скорости равен действительной скорости:

$$\left| \frac{df(z)}{dz} \right| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = v. \quad (75)$$

ВИХРЕВЫЕ ЛИНИИ И ТРУБКИ

Вихревая линия — линия, в каждой точке которой в данный момент вектор угловой скорости жидкости к ней касателен. Дифференциальные уравнения вихревой линии аналогичны дифференциальным уравнениям линий тока:

$$\frac{dx}{\omega_x} = \frac{dy}{\omega_y} = \frac{dz}{\omega_z}.$$

Поверхность, образованная вихревыми линиями, проходящими через какую-нибудь заданную линию в жидкости, называется вихревой поверхностью. Если заданная линия представляет замкнутый элементарный контур, то проходящие через неё вихревые линии образуют вихревую трубку. Жидкость, заключённая внутри вихревой трубки, называется вихревой нитью. Произ-

ведение величины вихревой скорости в какой-нибудь точке вихря на площадь поперечного сечения вихревой нити в этой точке называется напряжением вихревой нити:

$$dI = 2\omega \, d\delta. \quad (76)$$

Теорема Стокса. Циркуляция скорости по всякому замкнутому контуру, обращаемому в точку, не выходя из жидкости, равна удвоенной сумме напряжений всех вихревых нитей, проходящих сквозь этот контур:

$$\Gamma = \sum 2\omega \, d\delta = 2 \iint_{(\delta)} \omega \cdot d\delta. \quad (77)$$

Теорема Томсона. Если массовые силы имеют потенциал и плотность жидкости является функцией давления, то циркуляция скорости по любому замкнутому контуру во всё время движения является постоянной:

$$\frac{d\Gamma}{dt} = 0. \quad (78)$$

Теорема Лагранжа. Следствием теоремы Томсона является теорема Лагранжа. Если движение было в какой-нибудь момент потенциальным, то оно будет потенциальным во всё время движения.

ПРИНЦИП СОХРАНЕНИЯ ВИХРЕЙ

Принцип сохранения вихрей (устойчивость вихревой нити) определяется теоремами Гельмгольца:

- 1) напряжение вихревой нити вдоль её длины одинаково;
- 2) если силы, действующие на жидкость, имеют потенциал, то:
 - а) вихревая нить состоит всегда из одних и тех же частиц жидкости, даже передвигаясь или меняя свою форму;
 - б) напряжение вихревой нити во всё время движения остаётся постоянным.

ГИДРОДИНАМИКА РЕАЛЬНОЙ (ВЯЗКОЙ) ЖИДКОСТИ

РЕАЛЬНАЯ ЖИДКОСТЬ

В отличие от идеальной реальная жидкость обладает свойством вязкости—оказывать сопротивление растягивающим и касательным усилиям.

Для учёта всех сил, влияющих на формирование движения вязкой жидкости, необходимо вводить в рассмотрение некоторую добавочную силу на поверхности раздела в виде её нормальной и касательной составляющих.

По гипотезе Ньютона, касательные напряжения τ от действия сил вязкости равны:

$$\tau = \pm \mu \frac{dv}{dn}, \quad (79)$$

где μ — коэффициент вязкости;

$\frac{dv}{dn}$ — градиент скорости по нормали к перемещающимся слоям, или

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (80)$$

т. е. касательные напряжения по двум взаимно перпендикулярным плоскостям в любой точке равны друг другу.

Добавочные нормальные напряжения от действия сил вязкости будут растягивающими:

$$\left. \begin{aligned} p_{xx} &= 2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x}, & p_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v_y}{\partial y}, \\ p_{zz} &= 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z}. \end{aligned} \right\} \quad (81)$$

Благодаря влиянию сил вязкости гидродинамическое давление в реальной жидкости будет зависеть от направления рассматриваемой площадки. За гидродинамическое давление в точке в гидродинамике вязкой жидкости принимают среднее арифметическое гидродинамических давлений по трём взаимно перпендикулярным направлениям:

$$p = \frac{p_x + p_y + p_z}{3}, \quad (82)$$

величина которого не зависит от направления.

КОМПОНЕНТЫ СИЛ ВЯЗКОСТИ В ФУНКЦИИ КОМПОНЕНТОВ СКОРОСТИ

Компоненты сил вязкости, действующие на элементарный параллелепипед, равны сумме проекций поверхностных сил на оси координат и могут быть выражены в функции компонентов скоростей:

$$\left. \begin{aligned} X_s &= \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) dx \, dy \, dz \\ Y_s &= \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) dx \, dy \, dz \\ Z_s &= \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) dx \, dy \, dz \end{aligned} \right\}, \quad (83)$$

Если по аналогии с компонентами вихря ввести понятие о компонентах «вторых вихрей» («вихрей от вихрей»), равных:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \omega_z}{\partial y} - \frac{\partial \omega_y}{\partial z} \right) \\ \epsilon_y &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial x} \right) \\ \epsilon_z &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \omega_y}{\partial x} - \frac{\partial \omega_x}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (84)$$

то уравнения (83) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= -4\mu \varepsilon_x dx dy dz \\ Y_0 &= -4\mu \varepsilon_y dx dy dz \\ Z_0 &= -4\mu \varepsilon_z dx dy dz \end{aligned} \right\} \quad (85)$$

УРАВНЕНИЯ НАВЬЕ—СТОКСА

Вводя в уравнения Эйлера выведенные для идеальной жидкости компоненты сил вязкости, легко перейти к дифференциальным уравнениям движения реальной жидкости:

$$\left. \begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{dv_x}{dt} - \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{dv_y}{dt} - \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{dv_z}{dt} - \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (86)$$

Эти уравнения впервые были выведены Навье и Стоксом и являются основными уравнениями динамики вязкой жидкости. С помощью оператора Лапласа уравнения (86) приводятся к виду:

$$\left. \begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{dv_x}{dt} - \nu \Delta v_x \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{dv_y}{dt} - \nu \Delta v_y \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{dv_z}{dt} - \nu \Delta v_z \end{aligned} \right\} \quad (87)$$

где ν — кинематический коэффициент вязкости жидкости.

Если воспользоваться выражением компонентов сил вязкости через компоненты вторых вихрей, то уравнения (87) перейдут в

$$\left. \begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{dv_x}{dt} + 4\nu \varepsilon_x \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{dv_y}{dt} + 4\nu \varepsilon_y \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{dv_z}{dt} + 4\nu \varepsilon_z \end{aligned} \right\} \quad (88)$$

Ниже приведены уравнения Навье—Стокса и уравнение неразрывности в цилиндрических и сферических координатах.

В цилиндрических координатах r, φ, z :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv_r}{dt} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\varphi^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \right. \end{aligned} \right\} \quad (89)$$

$$\left. \begin{aligned} &+ \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{v_r}{r^2} \right) \\ &\frac{dv_\varphi}{dt} + v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{v_r v_\varphi}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \right. \\ &+ \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi}{r^2} \Big); \\ &\frac{dv_z}{dt} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \varphi^2} + \right. \\ &+ \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \Big); \\ &\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (89)$$

В сферических координатах r, φ, θ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv_r}{dt} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{v_\varphi}{r \sin \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - \frac{v_\theta^2 + v_\varphi^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \right. \\ &+ \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \\ &- \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{2v_r}{r^2} - \frac{2 \operatorname{ctg} \theta}{r^2} v_\theta \Big]; \\ \frac{dv_\theta}{dt} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_\varphi}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \varphi} &+ \frac{v_r v_\theta}{r} - \frac{v_\varphi^2 \operatorname{ctg} \theta}{r} = \\ &= -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \right. \\ &+ \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \\ &+ \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{2 \cos \theta}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \\ &+ \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta}{r^2 \sin^2 \theta} \Big]; \\ \frac{dv_\varphi}{dt} + v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \theta} + \frac{v_\varphi}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} &+ \frac{v_r v_\varphi}{r \sin \theta} \operatorname{ctg} \theta = -\frac{1}{\rho r \sin \theta} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \\ &+ \nu \left[\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \theta^2} + \right. \end{aligned} \right\} \quad (90)$$

$$\left. \begin{aligned}
& + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \theta} + \\
& + \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + \frac{2 \cos \theta}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \varphi} - \\
& \quad - \frac{v_\varphi}{r^2 \sin^2 \theta} \Big]; \\
& \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \\
& \quad + \frac{2v_r}{r} + \frac{v_\theta \operatorname{ctg} \theta}{r} = 0
\end{aligned} \right\} \quad (90)$$

Простейшие случаи интегрирования уравнений Навье—Стокса. Уравнения Навье—Стокса вместе с уравнением неразрывности (27) дают систему четырёх дифференциальных уравнений с четырьмя неизвестными: v_x , v_y , v_z и p , которая ввиду математической сложности разрешена лишь для некоторых частных случаев.

Ниже приведено несколько таких частных случаев интегрирования этой системы уравнений, причём в каждом из них предполагается существование потенциала U для массовых сил.

Движение потенциальное. Последние члены уравнений Навье—Стокса равны нулю:

$$\nu \cdot \Delta v_x = \nu \cdot \Delta v_y = \nu \cdot \Delta v_z = 0.$$

В результате получается известный интеграл Лагранжа—Коши:

$$U + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + \frac{\partial \varphi}{\partial t} = F(t). \quad (91)$$

Движение потенциальное установившееся. В данном случае $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0$, и интеграл получает вид:

$$U + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \text{const} \quad (92)$$

— интеграл Бернулли — Эйлера.

Движение установившееся. Интегрирование в этом случае уравнений по длине струйки приводит к интегралу Бернулли, справедливому для струйки реальной жидкости:

$$U + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + h_w = \text{const}, \quad (93)$$

где h_w — работа сил вязкости, потерянная единицей массы жидкости.

Для плавно изменяющегося потока последнее уравнение примет вид:

$$U + \frac{p}{\rho} + \frac{\alpha v_{cp}^2}{2} + h_w = \text{const}, \quad (94)$$

где $\alpha = \frac{\int v^3 d\omega}{v_{cp}^3 \cdot \omega}$ — поправочный коэффициент,

учитывающий неравномерность распределения скоростей в поперечном сечении потока — коэффициент Кориолиса.

Для ламинарного режима $\alpha = 2$, для турбулентного $\alpha = 1,04$.

ОДНОРАЗМЕРНОЕ НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ И УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ

Во многих задачах гидравлики представляется возможным, когда поперечные размеры потока по сравнению с его длиной весьма малы, рассматривать движение не как сумму движений элементарных струек, а как движение одной конечных размеров струи.

Уравнение такого движения, называемого одномерным, можно представить как функцию лишь двух переменных: времени t и расстояния l .

В общей форме уравнение одномерного неустановившегося движения имеет вид:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\partial p}{\partial l} + \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{v_{cp}^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + i_w = 0, \quad (95)$$

где i_w — член, учитывающий потери энергии на сопротивление и не являющийся непрерывной функцией от длины.

Для каплевой жидкости $\gamma = \text{const}$, и уравнение (95) примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial l} \left(z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v_{cp}^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + i_w = 0. \quad (96)$$

Если движение будет установившимся, член $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ выпадет из всех вышеприведённых уравнений.

ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ ПО ТРУБАМ

КРИТЕРИЙ РЕЙНОЛЬДСА

При движении жидкости возможны два характерных режима: 1) жидкость движется без пульсации скоростей, приводящей к перемешиванию движущегося потока; 2) жидкость движется с пульсацией скоростей — происходит перемешивание частиц движущегося потока жидкостью.

Первый режим называется ламинарным; второй — турбулентным.

Режим движения определяется критерием Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (97)$$

где v — средняя скорость движения жидкости;

d — диаметр трубопровода;

ν — кинематическая вязкость жидкости.

При $Re < 2300$ — режим ламинарный; при $Re > 2300$ — режим турбулентный.

Число Re , при котором ламинарный режим переходит в турбулентный, называется критическим числом Рейнольдса— $Re_{кр}$.

$Re_{кр}$, строго говоря, не является постоянным,—оно зависит от начальных возмущений на входном участке трубы. По Шиллеру Л. и Белоконов Н. И., минимальное значение $Re_{кр}=1160$, а максимальное $Re_{кр}=60\,000$.

КРИТЕРИЙ ПОДОБИЯ

Два потока называются подобными, если они удовлетворяют условиям:

геометрического подобия, т. е.

$$l_1 = \alpha_l \cdot l_2,$$

где α_l — коэффициент пропорциональности; l_1 и l_2 — линейные размеры потоков; кинематического подобия, т. е. между перемещениями двух потоков должно существовать соотношение:

$$\alpha = \frac{dx_1}{dx_2} = \frac{dy_1}{dy_2} = \frac{dz_1}{dz_2};$$

кроме того, отношения времени прохождения соответствующих участков двумя частями должны быть повсюду равны: $\alpha_t = \frac{t_1}{t_2}$;

динамического подобия, когда:

$$\frac{v_1 \cdot l_1}{\nu_1} = \frac{v_2 \cdot l_2}{\nu_2} = Re \text{ (параметр Рейнольдса);}$$

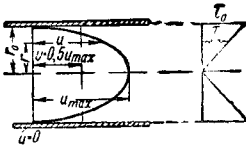
$$\frac{v_1^2 \cdot l_1}{g_1} = \frac{v_2^2 \cdot l_2}{g_2} = Fr \text{ (параметр Фруда).}$$

Одновременное выполнение этих двух условий не всегда возможно, ибо первое требует соблюдения $v \cdot l = \text{const}$, а второе $\frac{v^2}{l} = \text{const}$.

Если преобладает влияние вязкости, необходимо соблюдение условий Рейнольдса; в случае большего влияния сил тяжести необходимо выполнение условий Фруда.

ЛАМИНАРНЫЙ РЕЖИМ

Характеристика ламинарного режима. Кривая распределения скоростей в ламинарном потоке — парабола (фиг. 19) (формула Стокса):



$$v = \frac{\gamma \cdot i}{4\mu} (r_0^2 - r^2), \quad (98)$$

где i — «гидравлический уклон» — потеря напора на единицу длины трубопровода;

μ — абсолютная вязкость.

Максимальная скорость при $r=0$ (на оси потока)

$$v_{\max} = \frac{\gamma \cdot i}{4\mu} r_0^2. \quad (99)$$

Формула (98), выраженная через v_{\max} , принимает вид:

$$v = v_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right]. \quad (100)$$

Расход через трубу

$$Q = \frac{\pi r_0^2}{2} v_{\max}. \quad (101)$$

Средняя скорость потока:

$$v_{cp} = \frac{Q}{\omega} = 0,5 \cdot v_{\max} = \frac{\gamma d^2}{32\mu} i. \quad (102)$$

Из последней формулы можно определить потерю напора на единицу длины трубопровода (формула Пуазейля):

$$i = 32 \frac{\mu v_{cp}}{\gamma \cdot d^2}, \text{ или } i = \frac{128 \mu Q}{\pi \gamma d^4}. \quad (103)$$

Таким образом, потеря напора на единицу длины при ламинарном режиме пропорциональна первой степени средней скорости.

Формулу (103) можно привести к виду:

$$h = \frac{64 \nu}{v \cdot d} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = \frac{64}{Re} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}.$$

Безразмерную величину $\frac{64}{Re}$ называют коэффициентом гидравлического сопротивления λ .

Таким образом:

$$h = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (104)$$

где l — длина трубопровода.

Опытные данные подтверждают все приведенные теоретические уравнения.

Линии вихрей ламинарного потока. Ламинарное движение является вихревым:

$$v_x = \frac{\gamma i}{4\mu} (r_0^2 - r^2); \quad v_y = 0; \quad v_z = 0.$$

Компоненты вихря равны:

$$\left. \begin{aligned} \omega_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = 0 \\ \omega_y &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) = \\ &= -\frac{\gamma i}{4\mu} z = -az \\ \omega_z &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = \\ &= \frac{\gamma i}{4\mu} y = ay \end{aligned} \right\}. \quad (105)$$

Следовательно

$$\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} = \frac{\gamma i}{4\mu} r. \quad (106)$$

Уравнение вихревых линий

$$\frac{dy}{\omega_y} = \frac{dz}{\omega_z}$$

согласно формулам (105) примет вид:

$$y \cdot dy + z \cdot dz = 0.$$

После интегрирования

$$y^2 + z^2 = r^2, \quad (107)$$

т. е. «вихревые линии» суть концентрические окружности с центром на оси трубы.

Ламинарный поток в некруглых трубах. Все формулы, приведённые для движения жидкости в круглых трубах, имеют место и для случая движения жидкости по некруглым трубам с той лишь разницей, что расчёт ведётся не по диаметру d , а по гидравлическому радиусу R , равному

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \quad (108)$$

где ω — площадь живого сечения;

χ — смоченный периметр,

или по эквивалентному диаметру $d_s = 4R$.

Для круглой трубы:

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{\pi d^2}{4 \pi d} = \frac{d}{4}, \quad (109)$$

и формулы для h , Re и λ соответственно примут вид:

$$\left. \begin{aligned} h &= \lambda \frac{l}{4R} \cdot \frac{v^2}{2g}; \quad Re = \frac{4Rv}{\nu} \\ \lambda &= f \left(\frac{4Rv}{\nu} \right) \end{aligned} \right\} \quad (110)$$

Ниже приведены формулы для некоторых видов поперечного сечения труб (r_1 и r_2 — радиусы наружной и внутренней труб).

Концентрические трубы:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{r_1 - r_2}{2}; \quad Re = \frac{2v(r_1 - r_2)}{\nu} \\ h &= \lambda \frac{l}{2(r_1 - r_2)} \cdot \frac{v^2}{2g} \\ \lambda &= \frac{32\nu(r_1 - r_2)}{v \left(r_1^2 + r_2^2 + \frac{r_1^2 - r_2^2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \right)} \end{aligned} \right\} \quad (111)$$

Трубы прямоугольного сечения ($2a$ и $2b$ — стороны прямоугольника, причём $b < a$):

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{a \cdot b}{(a + b)}; \quad Re = \frac{4abv}{(a + b)\nu} \\ h &= \lambda \frac{l(a + b)}{4ab} \cdot \frac{v^2}{2g}; \quad \lambda = \frac{64}{Re} \varphi \left(\frac{a}{b} \right) \end{aligned} \right\} \quad (112)$$

где

$$\varphi \left(\frac{a}{b} \right) = \frac{8 \frac{a}{b}}{\left(1 + \frac{a}{b} \right)^2 \cdot f}. \quad (113)$$

Значение f берётся из табл. 18.

Таблица 18

Значение коэффициента f в формуле (113)

| f | 2,5 | 2,2 | 2,09 | 1,83 | 1,40 | 1,12 | 0,93 | 0,5 | 0 |
|---------------|-----|------|------|------|------|------|------|-----|----------|
| $\frac{a}{b}$ | 1 | 1,25 | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 10 | ∞ |

При $a \rightarrow \infty$

$$R = b; \quad Re = \frac{4vb}{\nu}; \quad \lambda = \frac{96}{Re}. \quad (114)$$

Начальный участок. Все вышеприведённые формулы справедливы для развивающегося ламинарного движения. Как показывает опыт, распределение скоростей при входе в трубу не подчиняется параболическому закону. Жидкость вступает в трубу приблизительно с одинаковой скоростью по всему поперечному сечению, исключая весьма тонкий слой, непосредственно прилегающий к стенке трубы. Постепенно, по мере удаления от входа, скорость осевых слоёв растёт, а пограничный слой, расширяясь, вызывает уменьшение скорости в наружных слоях жидкости.

На некотором расстоянии $l_{нач}$ устанавливается развитое ламинарное движение. Характер изменения распределения скорости в поперечном сечении по длине начального участка иллюстрируется табл. 19, где показано изменение коэффициента Кориолиса α .

Длина начального участка равна:

$$\left. \begin{aligned} \text{по Буссинеску } l_{нач} &= 0,065 d \cdot Re \\ \text{по Шиллеру } l_{нач} &= 0,02875 d \cdot Re \end{aligned} \right\} \quad (115)$$

Коэффициент λ для различных сечений начального участка по Шиллеру равен:

$$\lambda = \frac{A}{Re}. \quad (116)$$

Значения A приведены в табл. 20.

Таблица 19

Значение коэффициента α для различных сечений начального участка ламинарного потока

| $\frac{x \cdot 10^3}{d \cdot Re}$ | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|----|
| 0 | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 | 12,5 | 15 | 17,5 | 20 | 25 | 28,75 | 30 | 40 | 65 |
| по Буссинеску | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1,465 | 1,66 | 1,775 | 1,805 | 1,840 | 1,860 | — | — | 1,915 | — | 1,935 | 1,94 | 2 |
| по Шиллеру | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1,405 | 1,552 | 1,642 | 1,716 | 1,779 | 1,82 | 1,866 | 1,906 | 1,964 | 2 | — | — | — |

Т а б л и ц а 20

Значение коэффициента A в формуле $\lambda = \frac{A}{Re}$

| $\frac{x \cdot 10^3}{d \cdot Re}$ | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 | 12,5 | 15 | 17,5 | 20 | 22,5 | 25 | 28,75 |
|-----------------------------------|-----|-----|-------|----|------|-------|-------|--------|-------|------|-------|
| A | 122 | 105 | 96,66 | 88 | 82,4 | 79,16 | 76,41 | 74,375 | 72,77 | 71,5 | 69,56 |

ТУРБУЛЕНТНЫЙ РЕЖИМ

Осреднённая скорость. В отличие от ламинарного режима, в котором наблюдается постоянство скорости в рассматриваемой точке потока, турбулентный режим характерен быстрыми знакопеременными изменениями (пульсацией) местной скорости около некоторого её осреднённого значения.

Осреднённая местная скорость — средняя скорость в данной точке (она направлена по оси трубы), определяемая за достаточно большой промежуток времени T как

$$v = \frac{1}{T} \int_0^T v_i dt, \quad (117)$$

где v_i — вектор мгновенной скорости в данной точке потока.

Касательное напряжение. Если для плоского турбулентного потока ось x направить параллельно осреднённой скорости v_x , то суммарное касательное напряжение будет равно:

$$\tau = \pm \mu \frac{dv_x}{dy} + \rho l^2 \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^3, \quad (118)$$

где l — параметр Прандтля, называемый длиной пути перемешивания.

Исследования Кармана привели к следующей формуле для l :

$$l = k \left(\frac{dv_x}{dy} : \frac{d^2 v_x}{dy^2} \right), \quad (119)$$

где k — опытный коэффициент.

Если длина пути перемешивания $l \rightarrow 0$, то уравнение (118) даёт:

$$\tau = \mu \frac{dv_x}{dy},$$

т. е. в ламинарном потоке касательные напряжения пропорциональны вязкости и первой степени скорости.

В случае турбулентного режима второй член уравнения (118) значительно больше первого и вязкостным напряжением можно пренебречь:

$$\tau \approx \rho l^2 \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^3, \quad (120)$$

т. е. в турбулентном потоке касательное напряжение пропорционально плотности и квадрату скорости.

Пограничный слой. Условия движения турбулентного потока у твёрдых стенок имеют своеобразные особенности. В отличие от центральной части потока здесь возмож-

ность перемешивания жидкости исключается, так как наличие твёрдой границы исключает появление поперечных движений; длина пути перемешивания у стенки стремится к нулю. В связи с этим в непосредственной близости к стенкам образуется весьма тонкий ламинарный так называемый пограничный слой.

Толщина ламинарного пограничного слоя равна:

$$\delta = 11,6 \frac{\nu}{u_x} = 32,8 \frac{d}{Re \sqrt{\lambda}}, \quad (120 a)$$

где ν — кинематическая вязкость жидкости; λ — коэффициент гидравлического сопротивления;

u_x — скорость среза у стенки.

Закон распределения скоростей. Турбулентный поток вследствие перемешивания частиц жидкости отличается большей равномерностью распределения скоростей, причём с увеличением степени турбулентности отношение средней скорости по сечению к максимальной скорости приближается к единице.

На фиг. 20 приведена кривая $\frac{v}{v_{\max}} = f(\lg Re)$ по результатам опытов Стантона, Панелля и Никурадзе. Закон распределения скорости по сечению трубопровода определяется формулой Кармана:

$$\frac{v_{\max} - v}{v_*} = \frac{1}{K} \left[\ln \left(1 - \sqrt{\frac{r}{r_0}} \right) + \sqrt{\frac{r}{r_0}} \right], \quad (121)$$

где $v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ — скорость среза у стенки (τ_0 — напряжение на стенке). Опыты Никурадзе хорошо подтверждают теоретическую формулу Кармана.

Прандтль, пренебрегая изменением τ , даёт более простую зависимость:

$$\frac{v_{\max} - v}{v_*} = \frac{1}{K} \ln \frac{r}{r_0 - r}. \quad (122)$$

Последнее уравнение также подтверждается опытами Никурадзе, причём здесь величина K должна быть принята равной 0,40.

Закон распределения скоростей в турбулентном потоке может быть также выражен с помощью формулы

$$v = v_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{1}{n}} \right], \quad (123)$$

где n — функция числа Re (табл. 21).

Таблица 21

Значение коэффициента n в формуле (123)

| Re | $4 \cdot 10^3$ | $8 \cdot 10^3$ | $43 \cdot 10^3$ | $396 \cdot 10^3$ | $1536 \cdot 10^3$ | $3240 \cdot 10^3$ |
|------|----------------|----------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|
| n | 6 | 6,6 | 7 | 8,5 | 9,8 | 10,0 |

Значения $\frac{v_{cp}}{v_{max}}$ для турбулентного потока в зависимости от числа Re приведены в табл. 22.

Таблица 22

Значения $\frac{v_{cp}}{v_{max}}$ в зависимости от числа Рейнольдса

| Re | $4 \cdot 10^3$ | $43 \cdot 10^3$ | $200 \cdot 10^3$ | $700 \cdot 10^3$ | $3240 \cdot 10^3$ |
|--------------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|
| n | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| $\frac{v_{cp}}{v_{max}}$ | 0,792 | 0,817 | 0,837 | 0,848 | 0,856 |

Шероховатость труб. На практике обычно приходится иметь дело с трубами,

У гидравлически гладких труб толщина ламинарного пограничного слоя $\delta > e$. Если $\delta < e$, трубы гидравлически шероховатые.

Само понятие «гладкая» труба относительно: с увеличением числа Re толщина ламинарного пограничного слоя уменьшается и труба, будучи вначале «гладкой», начинает вести себя как «шероховатая».

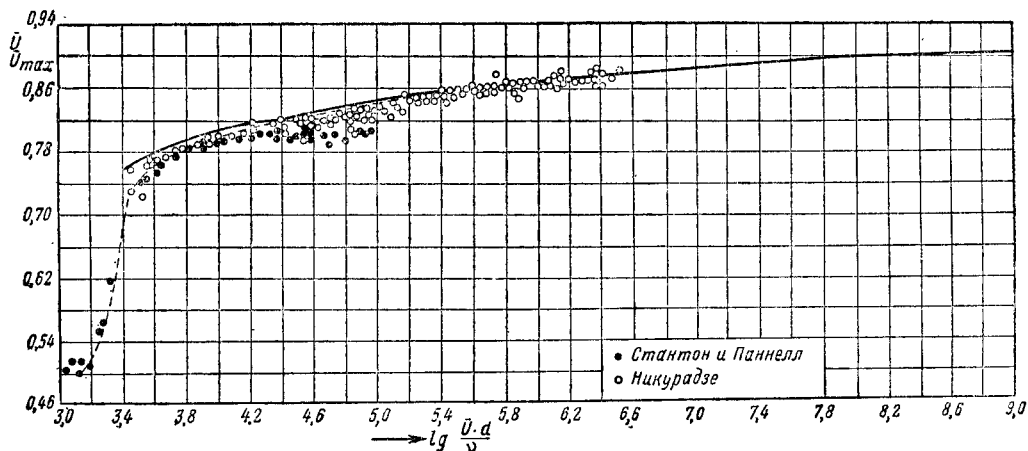
Абсолютная шероховатость труб e приведена в табл. 23.

Таблица 23

Абсолютная шероховатость труб

| Трубы | e в мм |
|---|-----------|
| Чистые цельнотянутые трубы из латуни, меди и свинца | 0,01 |
| Новые цельнотянутые стальные трубы | 0,05—0,15 |
| Стальные трубы с незначительной коррозией | 0,2—0,3 |
| Новые чугунные трубы | 0,3 |
| Асбоцементные трубы | 0,3—0,8 |
| Старые стальные трубы | 0,5—2,0 |

Эквивалентное соотношение высоты выступов песчаной (e_1) и полусферической (e_2) шероховатости $\frac{e_1}{e_2} = 1,4$.



Фиг. 20. Кривая распределения скоростей в турбулентном потоке в круглых трубах

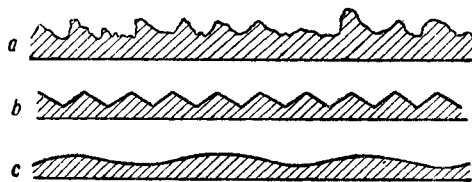
внутренняя поверхность которых не гладкая, а шероховатая. Во время эксплуатации трубы меняют свою шероховатость от появления ржавчины, различных осадков и т. п.

Шероховатость определяется высотой e выступов и относительным расстоянием их друг от друга.

Различают шероховатость неравномерную (фиг. 21, а) и равномерную (фиг. 21, б). В равномерную шероховатость входят также так называемая волнистость (фиг. 21, в) и полусферическая шероховатость (Белокоп Н. И.) — плотное распределение полусферических частиц.

Относительной шероховатостью называют отношение $\epsilon = \frac{e}{r_0}$.

Определение потерь в турбулентном потоке. Вследствие беспорядочности турбулентного движения потери энергии в нём



Фиг. 21

при прочих равных условиях превышают потери энергии в случае ламинарного режима. Коэффициент гидравлического сопротивления в формуле Дарси—Вейсбаха в общем

случае не является лишь функцией числа Re , как это имело место в ламинарном потоке. Для турбулентного потока

$$\lambda = f(Re, \varepsilon),$$

где ε — относительная шероховатость.

Для гладких труб, по Карману — Никурадзе, λ зависит только от числа Рейнольдса и определяется из уравнения

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -0,8 + 2 \lg(Re \sqrt{\lambda}), \quad (124)$$

или в менее точном, но более удобном виде:

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 \cdot Re^{-0,237}. \quad (125)$$

Формула (125) справедлива для $10^5 < Re < 10^8$.

Для гладких труб предложен также ряд эмпирических зависимостей λ от Re . Все они могут быть представлены в виде:

$$\lambda = A + B \cdot Re^{-m}, \quad (126)$$

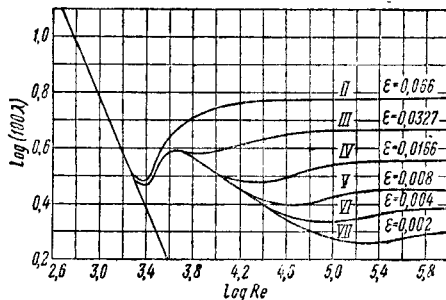
где A , B и m — постоянные (табл. 24).

Таблица 24
Значение коэффициентов A , B и m в формуле (126)

| Автор | A | B | m | Примечания |
|-------------------------|--------|--------|-------|---------------|
| Блазиус | 0 | 0,316 | 0,25 | Вода и воздух |
| Омбек | 0 | 0,242 | 0,224 | Воздух |
| Якоб | 0 | 0,327 | 0,254 | Вода и воздух |
| Лис | 0,0072 | 0,6104 | 0,35 | Вода и воздух |
| Шиллер-Герман | 0,0054 | 0,396 | 0,30 | Вода |
| Лоренц | 0,0076 | 0,399 | 0,394 | » |
| Никурадзе | 0,0032 | 0,221 | 0,237 | » |
| Рихтер | 0,0070 | 0,596 | 0,35 | Вода и воздух |

Для шероховатых труб $\lambda = f(Re, \varepsilon)$. Тип шероховатости в значительной степени влияет на λ .

Коэффициенты гидравлического сопротивления труб с равномерной песчаной шероховатостью, на основании очень тщательных опытов Никурадзе, приведены на фиг. 22. Из этой фигуры следует, что всю область чисел Re можно разделить на три зоны.



Фиг. 22. Зависимость коэффициента трения от шероховатости и числа Рейнольдса по опытам Никурадзе

В первой зоне при малых числах Re $\lambda = f(Re)$ и не зависит от шероховатости — труба гладкая. Эта зона охватывает область ламинарного режима и часть турбулентной области, тем большую, чем меньше относительная шероховатость.

Во второй зоне $\lambda = f(Re, \varepsilon)$:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} - 2 \lg \frac{r_0}{e} = f \left(\lg \frac{v_* e}{\nu} \right), \quad (127)$$

где

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}};$$

для $0,55 \leq \lg \frac{v_* e}{\nu} < 0,85$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} - 2 \lg \frac{r_0}{e} = 1,18 + 1,13 \lg \frac{v_* e}{\nu}; \quad (128)$$

для $0,85 \leq \lg \frac{v_* e}{\nu} \leq 1,15$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} - 2 \lg \frac{r_0}{e} = 2,14; \quad (129)$$

для $1,15 \leq \lg \frac{v_* e}{\nu} < 1,83$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} - 2 \lg \frac{r_0}{e} = 2,81 - 0,588 \lg \frac{v_* e}{\nu}. \quad (130)$$

В третьей зоне $\lambda = f(\varepsilon)$ — квадратичный закон сопротивления; сопротивление не зависит от числа Re и пропорционально квадрату скорости:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} - 2 \lg \frac{r_0}{e} = 1,74. \quad (131)$$

Эмпирические зависимости для третьей зоны имеют вид:

$$\lambda = A \cdot \varepsilon^{-x}, \quad (132)$$

где A и x — постоянные (табл. 25).

Таблица 25
Значения коэффициентов A и x в формуле (132)

| Автор | A | x |
|---------------------|-------|-------|
| Якимов | 0,15 | 0,333 |
| Шифринсон | 0,093 | 0,25 |

Часто применяют следующие критерии, разграничивающие отдельные зоны: при $Re_1 < \frac{40,0}{\sqrt{\lambda \cdot \varepsilon}}$ — трубы гладкие; при $Re_2 > \frac{382,4}{\sqrt{\lambda \cdot \varepsilon}}$ — квадратичный закон сопротивления (третья зона).

Если λ определять по формуле Блазиуса, то

$$Re_1 = \frac{59,5}{\varepsilon^{0,75}}.$$

Если λ определять по формуле Никурадзе (131), то

$$Re_2 = \frac{665,4 - 764,8 \lg \varepsilon}{\varepsilon}.$$

По Белоконов Н. И., для $\varepsilon < 1/60$

$$Re_1 = 18,6 \frac{1}{\varepsilon} \left(2 \lg \frac{1}{\varepsilon} + 1,74 \right).$$

В последнее время для определения λ Колебруком и Уайтом была предложена формула:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{\varepsilon}{7,4} + \frac{2,51}{\sqrt{\lambda} Re} \right). \quad (133)$$

Если пренебречь первым слагаемым в скобках, то формула (133) переходит в формулу (124); если пренебречь вторым слагаемым, то формула (133) переходит в формулу (131).

Для стальных труб формула (133) даёт лучшее согласование с опытными данными, чем формулы Никурадзе.

Чугунные трубопроводы, бывшие в употреблении, рассчитывают по формуле

$$i = 0,00148 \frac{Q^2}{d^{5,33}}, \quad (134)$$

где i — гидравлический уклон;

Q — расход воды в $м^3/сек$;

d — в $м$;

или, если трубы малых диаметров ($< 100 мм$), по формуле:

$$v = 85 R^{0,63} \cdot i^{0,54}, \quad (135)$$

где v — скорость в $м/сек$;

R — гидравлический радиус в $м$.

Для бетонных и железобетонных труб

$$i = 0,0009 \frac{v^2}{d^{1,4}}, \quad (136)$$

$$i = 0,0011 \frac{v^2}{d^{1,25}},$$

где v — в $м/сек$, d — в $м$.

Для деревянных труб

$$i = 0,000885 \frac{v^{1,8}}{d^{1,47}}, \quad (137)$$

где v — в $м/сек$, d — в $м$.

Потеря напора в пенковых и прорезиненных рукавах по Ясюковичу (Q — в $л/мин$, d — в $мм$);

$$i = 1000 K \frac{Q^{1,9}}{d^{5,25}}; \quad (138)$$

для пенковых рукавов $K=5,0$, прорезиненных — $K=3,0$, резиновых — $K=2,0$;

или:

$$i = K \frac{v^2}{d}; \quad (139)$$

для пенковых рукавов $K=0,00213$, прорезиненных — $K=0,0009$, резиновых — $K=0,00084$ (v — в $м/сек$, d — в $м$).

Коэффициент гидравлического сопротивления прорезиненных шлангов, армированных внутри проволокой, $\lambda_{ш}$ по Черникину В. И. равен:

$$\lambda_{ш} \approx \left(\lambda + \frac{16\delta^2}{dl} \right), \quad (139a)$$

где λ — вычисляется по формулам (126) или (132);

δ — высота выступов проволоочной спирали над внутренней поверхностью шланга;

l — шаг проволоочной спирали.

РАСЧЁТ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

КОРОТКИЕ ТРУБОПРОВОДЫ

Если суммарные потери в трубопроводе на местные сопротивления и сопротивление по длине сопоставимы между собой, то такой трубопровод называется коротким.

Расход, устанавливающийся в коротком трубопроводе:

$$Q = \omega \sqrt{2gH}, \quad (140)$$

где ω — площадь поперечного сечения трубопровода;

μ — коэффициент расхода;

при истечении в атмосферу

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \Sigma \xi + \lambda \frac{l}{d}}};$$

при истечении под уровень жидкости

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\Sigma \xi + \lambda \frac{l}{d}}};$$

H — напор;

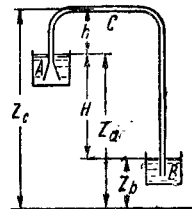
l — длина трубопровода диаметром d ;

$\Sigma \xi$ — сумма коэффициентов местных сопротивлений;

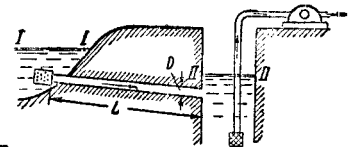
λ — коэффициент гидравлического сопротивления.

Ниже приведено несколько типов коротких трубопроводов.

Сифон. Максимальная высота сифона (фиг. 23), при которой перетекание жидко-



Фиг. 23



Фиг. 24

сти становится невозможным из-за давления в струе ниже давления паров жидкости,

$$h_{\max} = \frac{p_a - p_y}{\gamma} - H \frac{\lambda L_{AC} + d}{\lambda L + d}, \quad (141)$$

где L_{AC} — длина участка AC;

L — длина сифонной трубы AB;

d — диаметр сифонной трубы;

p_a — давление на поверхность жидкости;

p_y — упругость паров жидкости.

Величина вакуума при скорости перетекания v равна

$$h_s = \frac{v^2}{2g} + h + h_n, \quad (142)$$

где h_n — потеря напора на пути трубопровода до точки C.

Самотёчная труба (фиг. 24). Необходимый диаметр трубы для поддержания заданного расхода определяется по уравнению (140).

Дюкер (провод) — труба, проложенная под выемкой.

Расчёт дюкера сводится к определению его диаметра, обеспечивающего данный расход, по тому же уравнению (140).

Всасывающая труба (фиг. 24). Задача сводится к определению геометрической высоты всасывания

$$h = H_g - \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \Sigma \xi\right) \frac{v_{вс}^2}{2g}, \quad (143)$$

где H_g — вакуум у насоса;

$v_{вс}$ — скорость всасывания.

ДЛИННЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ

Если потери напора в трубопроводе на местные сопротивления незначительны по сравнению с потерями по длине, то такой трубопровод считают длинным. В практических расчётах выбираемый напор предусматривает определённый запас на местные сопротивления (обычно 2÷5%).

Если считать движение на участках трубопровода одного диаметра равномерным, то для каждого из них

$$Q = K \sqrt{I}, \quad H = Q^2 \frac{L}{K^2}, \quad (144)$$

где $K = \omega C \sqrt{R}$ — расходная характеристика, или модуль расхода;

Q — расход;

H — потеря напора в трубопроводе длиной L ;

C — коэффициент Шези, $C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$;

R — гидравлический радиус.

Таблица 26
Значения скоростных и расходных характеристик по формуле Маннинга (173)

| Диаметр | | Чистые трубы $\frac{1}{n} = 90$ | | | |
|---------|-------|---------------------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| в дм | в мм | S в м/сек | K в л/сек | $\frac{K^2}{1000}$ | $\frac{1000}{K^2}$ |
| 1,5 | 40 | 4,424 | 5,308 | 0,028 | 35,50 |
| 2 | 50 | 5,175 | 9,624 | 0,092 | 10,80 |
| 3 | 75 | 6,423 | 28,37 | 0,805 | 1,242 |
| 4 | 100 | 7,771 | 61,11 | 3,734 | 0,269 |
| 5 | 125 | 9,030 | 110,8 | 12,28 | 0,0813 |
| 6 | 150 | 10,186 | 180,2 | 32,46 | 0,0309 |
| 7 | 175 | 11,342 | 271,8 | 73,86 | 0,0134 |
| 8 | 200 | 12,353 | 388,0 | 150,6 | 0,0066 |
| 9 | 225 | 13,359 | 531,2 | 282,2 | 0,0035 |
| 10 | 250 | 14,332 | 703,5 | 494,9 | 0,0023 |
| 12 | 300 | 16,248 | 1 144 | 1 309 | 0,00076 |
| 14 | 350 | 17,934 | 1 726 | 2 978 | 0,00034 |
| 16 | 400 | 19,643 | 2 464 | 6 070 | 0,00016 |
| 18 | 450 | 21,207 | 3 373 | 11 380 | 0,00009 |
| 20 | 500 | 22,756 | 4 467 | 19 850 | 0,00005 |
| 24 | 600 | 25,717 | 7 264 | 52 750 | 0,0000189 |
| 28 | 700 | 28,535 | 10 960 | 120 100 | 0,0000083 |
| 30 | 750 | 29,808 | 13 170 | 173 400 | 0,0000058 |
| 32 | 800 | 31,172 | 15 640 | 244 700 | 0,0000041 |
| 36 | 900 | 33,664 | 21 420 | 753 600 | 0,0000022 |
| 40 | 1 000 | 36,120 | 28 360 | 801 500 | 0,0000021 |

Продолжение табл. 26

| Диаметр | | Нормальные трубы $\frac{1}{n} = 80$ | | | |
|---------|-------|-------------------------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| в дм | в мм | S в м/сек | K в л/сек | $\frac{K^2}{1000}$ | $\frac{1000}{K^2}$ |
| 1,5 | 40 | 3,713 | 4,666 | 0,022 | 45,58 |
| 2 | 50 | 4,550 | 8,460 | 0,072 | 13,87 |
| 3 | 75 | 5,646 | 24,94 | 0,622 | 1,607 |
| 4 | 100 | 6,823 | 53,72 | 2,886 | 0,353 |
| 5 | 125 | 7,930 | 97,40 | 9,487 | 0,105 |
| 6 | 150 | 8,954 | 158,4 | 25,09 | 0,0400 |
| 7 | 175 | 9,938 | 238,9 | 57,08 | 0,0175 |
| 8 | 200 | 10,859 | 341,0 | 116,4 | 0,0086 |
| 9 | 225 | 11,744 | 467,0 | 218,1 | 0,0046 |
| 10 | 250 | 12,605 | 618,5 | 382,5 | 0,0026 |
| 12 | 300 | 14,224 | 1 006 | 1 011 | 0,00098 |
| 14 | 350 | 15,766 | 1 517 | 2 301 | 0,00041 |
| 16 | 400 | 17,240 | 2 166 | 4 691 | 0,00021 |
| 18 | 450 | 18,542 | 2 965 | 8 792 | 0,00011 |
| 20 | 500 | 20,003 | 3 927 | 15 410 | 0,00006 |
| 24 | 600 | 22,574 | 6 386 | 40 780 | 0,0000246 |
| 28 | 700 | 25,019 | 9 632 | 92 780 | 0,0000108 |
| 30 | 750 | 26,205 | 11 580 | 134 100 | 0,0000075 |
| 32 | 800 | 27,369 | 13 750 | 189 100 | 0,0000053 |
| 36 | 900 | 29,591 | 18 830 | 354 500 | 0,0000023 |
| 40 | 1 000 | 31,750 | 24 930 | 621 700 | 0,0000016 |

| Диаметр | | Грязные трубы $\frac{1}{n} = 70$ | | | |
|---------|-------|----------------------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| в дм | в мм | S в м/сек | K в л/сек | $\frac{K^2}{1000}$ | $\frac{1000}{K^2}$ |
| 1,5 | 40 | 3,219 | 4,083 | 0,017 | 59,99 |
| 2 | 50 | 3,981 | 7,403 | 0,055 | 18,25 |
| 3 | 75 | 4,941 | 21,83 | 0,476 | 2,098 |
| 4 | 100 | 5,973 | 47,01 | 2,269 | 0,455 |
| 5 | 125 | 6,945 | 85,23 | 7,264 | 0,138 |
| 6 | 150 | 7,834 | 138,6 | 19,21 | 0,0526 |
| 7 | 175 | 8,685 | 209,0 | 43,70 | 0,0224 |
| 8 | 200 | 9,501 | 298,5 | 89,08 | 0,0112 |
| 9 | 225 | 10,276 | 408,6 | 167,0 | 0,0060 |
| 10 | 250 | 11,029 | 541,2 | 292,8 | 0,0034 |
| 12 | 300 | 12,445 | 880 | 774,4 | 0,0013 |
| 14 | 350 | 13,796 | 1 327 | 1 762 | 0,00057 |
| 16 | 400 | 15,085 | 1 895 | 3 592 | 0,0002 |
| 18 | 450 | 16,314 | 2 594 | 6 731 | 0,00015 |
| 20 | 500 | 17,501 | 3 436 | 11 810 | 0,00008 |
| 24 | 600 | 19,744 | 5 587 | 31 220 | 0,0000392 |
| 28 | 700 | 21,883 | 8 428 | 71 040 | 0,0000141 |
| 30 | 750 | 22,932 | 10 130 | 102 600 | 0,0000097 |
| 32 | 800 | 23,998 | 12 030 | 144 800 | 0,0000069 |
| 36 | 900 | 25,882 | 16 470 | 271 400 | 0,0000037 |
| 40 | 1 000 | 27,780 | 21 820 | 476 000 | 0,0000021 |

Для водопроводных труб различного диаметра составлены таблицы значений K и K^2 , вычисленных в соответствии с одной из формул для коэффициента Шези C .

В табл. 26 даны значения K по формуле Маннинга, а также значения скоростной характеристики $S = C \sqrt{R}$.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ

Последовательным соединением называется такое соединение, при котором расход жидкости на всём протяжении трубопровода остаётся постоянным, сам же трубопровод состоит из отдельных участков различных длин и диаметров.

При последовательном соединении трубопроводов

$$H = Q^2 \sum \frac{L_i}{K_i^2}. \quad (145)$$

Расчёт последовательного соединения труб различного диаметра значительно упрощается, если он ведётся по диаметру эквивалентного трубопровода. Эквивалентный трубопровод — это фиктивный трубопровод равной длины с данным и таким постоянным диаметром D , который обуславливает равенство потерь напора в действительном и эквивалентном трубопроводах.

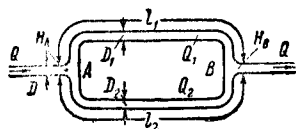
При условии, что λ не зависит от диаметра трубы, эквивалентный диаметр

$$D_0 = \sqrt[5]{\frac{L}{\frac{l_1}{D_1^5} + \frac{l_2}{D_2^5} + \dots + \frac{l_n}{D_n^5}}} = \sqrt[5]{\frac{L}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{D_i^5}}}, \quad (146)$$

где L — длина трубопровода;
 l — длина участков равного диаметра D .

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ

Параллельным соединением называется такое соединение, при котором потери напора



Фиг. 25

ра в любом трубопроводе, соединяющем точки A и B (фиг. 25), равны

$$H = H_A - H_B.$$

Расход через любой трубопровод

$$Q_i = K_i \sqrt{\frac{H}{l_i}}. \quad (147)$$

Система n таких уравнений и уравнение баланса расхода

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

позволяют определить $(n+1)$ неизвестных, которыми чаще всего бывают напор H и n расходов в каждой линии.

УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ. ЛЮПИНГИ

Для увеличения производительности трубопровода можно: а) увеличить число насосных станций; б) поставить люпинги;

в) повысить напор действующих станций; г) уменьшить подогревом вязкость перекачиваемой жидкости.

При увеличении числа насосных станций новый расход

$$Q = n^{\frac{1}{2-m}} \cdot Q_0, \quad (148)$$

где Q_0 — прежний расход;

n — число участков, на которое разделён трубопровод;

m — показатель степени при числе Рейнольдса в формуле $\lambda = \frac{B}{Re^m}$.

Если поставлена одна станция, т. е. $n=2$, режим турбулентный и по Блазиусу $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{1/4}}$ ($m=1/4$), то расход:

$$Q = 2^{\frac{1}{2-0,25}} Q_0 = 1,485 Q_0.$$

Вставка люпинга (подключение параллельной трубы) уменьшает потери в трубопроводе, что позволяет увеличить её производительность.

Длина люпинга X , определяющего новый расход Q :

$$X = \varphi \left[1 - \left(\frac{Q_0}{Q} \right)^{2-m} \right] l, \quad (149)$$

где l — длина трубопровода;

φ — коэффициент, равный:

а) при диаметре люпинга, равном диаметру трубопровода,

$$\varphi = \frac{1}{1 - \frac{1}{2^{2-m}}}; \quad (150)$$

б) при диаметре люпинга d_1 и диаметре трубопровода d_2

$$\varphi = \frac{\left[1 + \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{\frac{5-m}{2-m}} \right]^{2-m}}{\left[1 + \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{\frac{5-m}{2-m}} \right]^{2-m} - 1}. \quad (151)$$

Новый расход Q , определяемый увеличенным напором h , находят из уравнения

$$\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^{\frac{1}{2-m}}. \quad (152)$$

На практике увеличение производительности достигается комбинированием этих трёх способов в зависимости от экономических соображений.

ЗАВИСИМОСТЬ ПОТЕРИ НАПОРА ОТ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА

Непрерывный расход в пути. При расчёте водопроводных систем часто представляется возможным приближённо принимать, что расход по пути убывает непрерывно на единицу длины трубопровода (фиг. 26).

Потеря напора на участке длиной S в этом случае

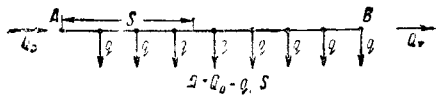
$$H_s = \frac{Q_0^3 - (Q_0 - q \cdot S)^3}{3 K^2 q}, \quad (153)$$

где Q_0 — расход в точке A ;
 q — расход на единицу длины трубопровода.

Путевой расход. В частном случае, когда расход в конце трубы равен нулю, длина трубы $S = l$ и $Q_0 = ql$, формула (153) принимает вид:

$$H_{AB} = \frac{Q_0^2 l}{3 K^2}. \quad (154)$$

Расход в этом случае называется путевым — Q_n .



Фиг. 26

Из формул (144) и (154) видно, что при непрерывной раздаче потеря напора в 3 раза меньше, чем при постоянном расходе.

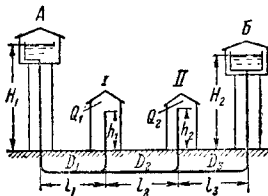
Транзитный расход. Если $S = l$, $Q_0 > ql$, то $Q_0 - ql = Q_0 - Q_n = Q_T$ называется транзитным расходом.

Потеря напора в этом случае

$$H_{AB} = \frac{(Q_n + Q_T)^3 - Q_T^3}{3 K^2 q}. \quad (155)$$

ЗАДАЧА О ДВУХ РЕЗЕРВУАРАХ

Если (фиг. 27) A и B — питающие резервуары, I и II — расходные пункты, то режим питания может быть одним из нижеследующих.



Фиг. 27

1. Пункт I питается из резервуара A , пункт II — из резервуара B . Такой режим требует равенства пьезометрических высот h_1 и h_2 в обоих пунктах. Последнее возможно при условии (фиг. 28)

$$H_1 - \frac{Q_1^2 l_1}{K_1^2} = H_2 - \frac{Q_2^2 l_3}{K_3^2}. \quad (156)$$

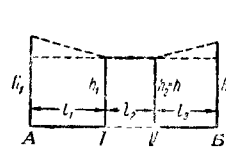
2. Оба пункта питаются из резервуара A (фиг. 29), что возможно при $h_2 = H_2$, т. е. должно быть соблюдено равенство

$$H_1 - \left[\frac{(Q_1 + Q_2)^2}{K_2^2} l_1 + \frac{Q_2^2 l_2}{K_2^2} \right] = H_2. \quad (157)$$

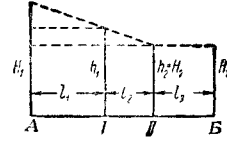
3. Пункт I питается из резервуара A , пункт II — из резервуаров A и B (фиг. 30). Этот случай соответствует условию

$$H_1 - \left[\frac{(Q + q)^2}{K_1^2} l_1 + \frac{q^2 l_2}{K_2^2} \right] = H_2 - \frac{(Q_2 - q)^2 l_3}{K_3^2}, \quad (158)$$

где q — часть расхода Q , получаемая пунктом II из резервуара A .

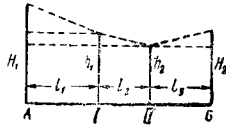


Фиг. 28

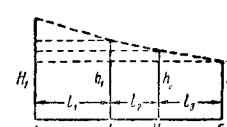


Фиг. 29

4. Пункты I и II и резервуар B питаются из резервуара A (фиг. 31).



Фиг. 30



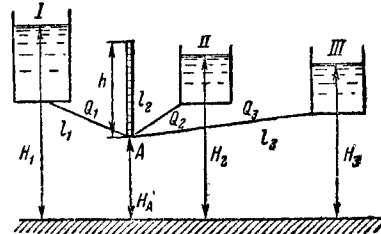
Фиг. 31

Условие такого режима может быть выражено равенством

$$H_1 - \left[\frac{(Q_1 + Q_2 + Q_B)^2}{K_1^2} l_1 + \frac{(Q_2 + Q_B)^2}{K_2^2} l_2 + \frac{Q_B^2 l_3}{K_3^2} \right] = H_2. \quad (159)$$

ЗАДАЧА О ТРЁХ РЕЗЕРВУАРАХ

Если три резервуара расположены так, как это показано на фиг. 32, и величины $H_1, H_2, H_3; l_1, l_2, l_3; d_1, d_2, d_3; H_A$ являются заданными, то при определении пока-

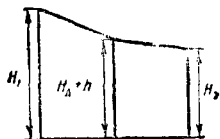


Фиг. 32

зания пьезометра в точке A и расходов Q_1, Q_2 и Q_3 возможны три случая.

1. Резервуар II является питаемым. Пьезометрическая линия показана на

фиг. 33. Аналитически этот случай выражается следующей системой уравнений:

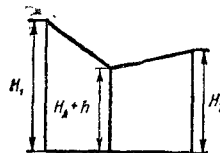


Фиг. 33

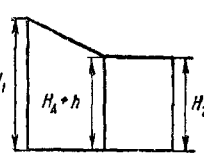
$$\left. \begin{aligned} H_1 - (h + H_A) &= \frac{l_1 \cdot Q_1^2}{K_1^2} \\ h + H_A &= H_2 + \frac{l_2 \cdot Q_2^2}{K_2^2} \\ h + H_A &= H_2 + \frac{l_3 \cdot Q_3^2}{K_3^2} \end{aligned} \right\} \quad (160)$$

2. Если h при решении системы уравнений (160) получит минимое значение, то резервуар II — не питаемый, а питающий. Пьезометрическая линия дана на фиг. 34; при этом $Q_1 + Q_2 = Q_3$ и $H_A + h < H_2$.

3. Если при решении системы уравнений (160) будет иметь место равенство $H_A + h = H_2$, то резервуар II будет запасным, и на участке l_2 движения воды не



Фиг. 34



Фиг. 35

будет. Пьезометрическая линия соответственно будет иметь вид, представленный на фиг. 35.

МЕСТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Наряду с потерей напора по длине во всяком трубопроводе имеют место так называемые местные потери напора, обуславливаемые местными сопротивлениями (задвижки, тройники, краны, клапаны и т. д.), где скорость меняется по величине или по направлению.

Падение напора, вызываемое местным сопротивлением, определяется формулой

$$h = \xi \frac{v_2^2}{2g}, \quad (161)$$

где ξ — коэффициент местного сопротивления.

Ниже приведены значения коэффициентов ξ для наиболее типичных видов местных сопротивлений.

Внезапное сужение или расширение. Согласно теореме Борда:

$$h = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}, \quad (162)$$

где v_1 и v_2 — скорости в сечениях 1—1 и 2—2 (фиг. 36).

Уравнения (161) и (162) дают для этого случая:

$$\xi = \left(\frac{v_1}{v_2} - 1 \right)^2 = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2. \quad (163)$$

Опытные данные для внезапного сужения труб приведены в табл. 27, для диафрагм — в табл. 28.

Таблица 27

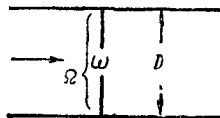
Коэффициент сопротивления при внезапном сужении трубы

| Отношение площадей $\omega_1 : \omega_2$ | 0,01 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,00 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| По Вейсбаху | 0,5 | 0,5 | 0,42 | 0,34 | 0,25 | 0,15 | 0,00 |
| По Мерримену | 0,45 | 0,39 | 0,35 | 0,28 | 0,20 | 0,09 | 0,00 |

Таблица 28

Коэффициент сопротивления диафрагмы (фиг. 37)

| $\frac{\omega}{\Sigma}$ | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
|-------------------------|-------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| ξ | 225,9 | 47,8 | 17,5 | 7,8 | 3,8 | 1,8 | 0,8 | 0,3 | 0,06 |



Фиг. 37



Фиг. 38

Вход в трубу и выход из неё.

а) Цилиндрическая труба отходит под углом α :

$$\xi_{ex} = 0,505 + 0,303 \cdot \sin \alpha + 0,226 \sin^2 \alpha.$$

б) Труба отходит перпендикулярно:

кромки входа острые: $\xi_{ex} = 0,50$;

кромки входа плавные: $\xi_{ex} = 0,1 \div 0,04$.

Колена и закругления в трубах.

а) Колено без закругления (фиг. 38).

Для труб малого диаметра:

$$\xi = 0,946 \sin^2 \frac{\theta}{2} + 2,05 \sin^4 \frac{\theta}{2}.$$

Значение ξ для различных углов θ приведены в табл. 29.

Таблица 29
Коэффициент сопротивления колен без закругления

| θ° | 20 | 40 | 60 | 80 | 90 | 100 | 120 | 140 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| ξ | 0,046 | 0,139 | 0,364 | 0,740 | 0,985 | 1,26 | 1,861 | 2,431 |

Для труб большого диаметра:

$$\xi = 6,76 \cdot (\theta^\circ)^{2,17} \cdot 10^{-5};$$

б) Колено с закруглением (фиг. 39):

1) для круглой трубы

$$\xi = \left[0,131 + 0,163 \left(\frac{d}{R} \right)^{3,5} \right] \frac{\theta^\circ}{90^\circ};$$



Фиг. 39

2) для прямоугольной трубы с размером b в плоскости закругления

$$\xi = \left[0,124 + 3,104 \left(\frac{b}{2R} \right)^{3,5} \right] \frac{\theta^\circ}{90^\circ}.$$

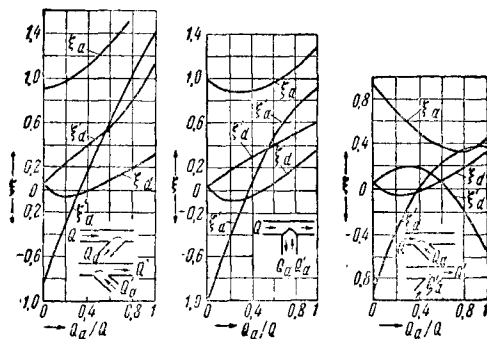
Для труб большого диаметра

$$\xi = 0,25 \frac{\theta^\circ}{90^\circ}.$$

Тройники. Величина потерь будет определяться характером ответвления и соотношением расходов в основном трубопроводе Q и в ответвлении Q_a (фиг. 40).

ξ_a — коэффициент сопротивления для ответвлений, отнесённый к скоростному напору в магистрали;

ξ_d — коэффициент сопротивления для магистрали.



Фиг. 40

Дроссельные клапаны и пробковый кран (табл. 30).

Задвижки и вентили. Для различных вентилей значения коэффициента сопротивления приведены в табл. 31.

Зависимость коэффициента сопротивления задвижки в круглой трубе от отношения высоты поднятия к диаметру трубы дана в табл. 32.

Клапаны. Значения коэффициентов сопротивления для клапанов приведены в табл. 33.

Решётки. Для вертикальных решёток (фиг. 41 — 43)

$$\xi = \beta \left(\frac{s}{b} \right)^{4/3},$$

Таблица 30

Коэффициент сопротивления шиберных и пробковых кранов

| Углы от- крытия α | 5° | 10° | 15° | 20° | 25° | 30° | 35° | 40° | 45° | 50° | 55° | 60° | 65° | 82,5° |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|----------|
| Шиберный кран | 0,24 | 0,52 | 0,9 | 1,54 | 2,51 | 3,91 | 6,22 | 10,8 | 18,7 | 32,6 | 58,8 | 118 | 256 | — |
| Пробковый кран | 0,05 | 0,29 | 0,75 | 1,56 | 3,10 | 5,47 | 9,68 | 17,3 | 31,2 | 52,6 | 106 | 206 | 496 | ∞ |

Таблица 31

Значения коэффициентов сопротивления вентилей при полном открытии

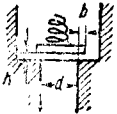
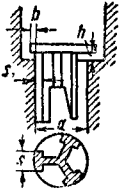
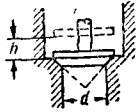
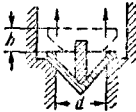
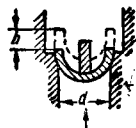
| Вентиль | ξ |
|-----------------------|-----------|
| Косва | 1,85—1,40 |
| Прямоточный | 0,44—0,8 |
| Нормальный | 2,9 |
| Рей | 1,96 |

Таблица 32

Коэффициент сопротивления задвижек в зависимости от степени открытия $\frac{h}{D}$

| h/D | 13/72 | 7/36 | 5/24 | 1/4 | 1/3 | 3/8 | 5/12 | 11/24 | 1/2 | 7/12 | 2/3 | 1 |
|---|-------|------|------|-----|-----|-----|------|-------|-----|------|------|------|
| Малые трубы ($D < 0,5$ м) | 43 | 35 | 28 | 17 | 7,9 | 5,5 | 4,0 | 2,9 | 2,0 | 1,1 | 0,57 | 0,05 |
| Большие трубы ($D > 0,5$ м) | 41 | 35 | 31 | 23 | 12 | 8,6 | 6,3 | 4,6 | 3,3 | 1,5 | 0,77 | 0,06 |

Таблица 33
Значения коэффициентов сопротивления ξ клапанов

| Тип клапана | Значения коэффициентов |
|---|--|
| Тарельчатый клапан без нижнего направления  | $\xi = \alpha + \beta \left(\frac{d}{h} \right)^2$ $4 < d : h < 10;$ $4b < d < 10b$ $\alpha = 0,55 + 4(b - 0,1d) : d$ $\beta = 0,16 \div 0,15$ |
| Тарельчатый клапан с нижним направлением  | $\xi = \alpha + \beta [d^2 : (\pi d - is) h]^2$ $4 < d : h < 8$ $i - \text{число рёбер};$ $s - \text{ширина ребра}$ $\alpha = (0,8 \div 1,6) [0,55 + 4(b - 0,1d) : d]$ в зависимости от степени стеснения рёбрами площади прохода от 0,87 до 0,8 ω $\beta = 1,7 \div 1,75$ |
| Конусный клапан с плоской нижней поверхностью  | $\xi = 2,6 - 0,8(d : h) + 0,14(d : h)^2$ $4 < d : h < 10$ $10b = d$ |
| Конусный клапан с конусной поверхностью  | $\xi = 0,6 + 0,15(d : h)^2$ $2,5 < d : h < 8$ |
| Шаровый клапан с конусной опорной поверхностью  | $\xi = 2,7 - 0,8(d : h) + 0,14(d : h)^2$ $4 < d : h < 10$ |

где β — некоторый коэффициент, значения которого в зависимости от типа решёток приведены в табл. 34 (фиг. 42).

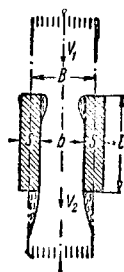
Таблица 34
Коэффициент β для решёток различных типов

| Тип сечения стержней решётки | a | b | c | d | e | f | g |
|------------------------------|------|------|------|-------|------|------|------|
| β | 2,42 | 1,83 | 1,67 | 1,035 | 0,92 | 0,76 | 1,79 |

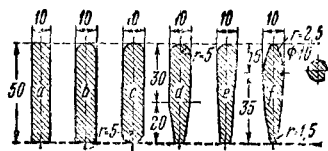
Если характер обтекания решётки аналогичен обтеканию решётки с квадратным сечением стержней (фиг. 43), то коэффициент сопротивления ξ определяется формулой

$$\xi = \left(\frac{b + s}{\varepsilon \cdot b} - 1 \right)^2,$$

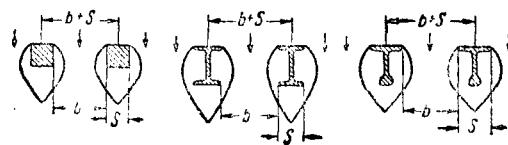
где коэффициент сжатия ε берётся в зависимости от $x = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ по табл. 35.



Фиг. 41



Фиг. 42



Фиг. 43

Переходные расширяющиеся конусы (фиг. 44). Коэффициент сопротивления, отнесённый к выходной скорости, равен

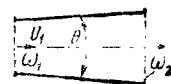
$$\xi = K \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2,$$

где K зависит от угла θ и берётся по табл. 36.

Таблица 35

Коэффициент сжатия решёток ε в зависимости от $\frac{\omega_1}{\omega_2}$

| X | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ε | 0,611 | 0,612 | 0,616 | 0,622 | 0,633 | 0,644 | 0,662 | 0,687 | 0,722 | 0,781 | 1,000 |



Фиг. 44

Таблица 36
Коэффициенты сопротивления переходных расширяющихся конусов

| θ° | K | θ° | K | θ° | K | θ° | K |
|----|------|----|------|----|------|-----|------|
| 5 | 0,13 | 30 | 0,71 | 60 | 1,12 | 100 | 1,06 |
| 10 | 0,17 | 40 | 0,90 | 70 | 1,13 | 120 | 1,06 |
| 15 | 0,26 | 45 | 0,93 | 80 | 1,10 | 140 | 1,04 |
| 20 | 0,41 | 50 | 1,03 | 90 | 1,07 | 160 | 1,02 |

Обратный клапан. В табл. 36а приведены значения коэффициента сопротивления всасывающих коробок с обратным клапаном.

Таблица 36а
Коэффициенты сопротивления всасывающих коробок с обратным клапаном

| d в м | 0,04 | 0,07 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,30 | 0,50 | 0,75 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ξ | 12 | 8,5 | 7 | 6 | 5,2 | 3,7 | 2,5 | 1,6 |

Если всасывающая коробка не снабжена обратным клапаном, то ξ определяется по формуле:

$$\xi = (0,675 \div 1,575) \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2, \quad (164)$$

где ω — площадь поперечного сечения трубы;
ω_с — сумма площадей отверстий сетки.

При пользовании справочными данными необходимо иметь в виду, что коэффициенты даны применительно к скоростному напору после местного сопротивления.

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ДЛИНА МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Из равенства потерь напора на местные сопротивления по формуле Вейсбаха и потерь по длине по уравнению Дарси

$$\lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} = \xi \frac{v^2}{2g}$$

следует

$$l = \frac{\xi}{\lambda} d. \quad (165)$$

Величина l, представляющая собой длину трубопровода, эквивалентную по гидравлическому сопротивлению местному сопротивлению, называется эквивалентной длиной местного сопротивления.

Длина l, эквивалентная n местным сопротивлениям, будет равна

$$l_n = \frac{d}{\lambda} \sum_{i=1}^n \xi_i. \quad (166)$$

Таким образом, если трубопровод диаметра d с геометрической длиной L имеет местные сопротивления, то его можно рассчитывать по формуле Дарси, но не по действительной длине, а по приведённой длине, равной

$$\bar{l} = L + l_n. \quad (167)$$

где l_n — длина трубопровода, эквивалентная местным сопротивлениям.

Эквивалентные длины наиболее часто встречающихся местных сопротивлений приведены в табл. 37.

Таблица 37
Эквивалентные длины некоторых местных сопротивлений

| Наименование местного сопротивления | Значение $\frac{l}{d}$ |
|--|------------------------|
| Вход жидкости из резервуара в трубу с острыми краями | 20 |
| То же, если труба вдавливается внутрь резервуара | 40 |
| То же при округлённых краях входной трубы | Ничтожно |
| Колена (отводы) с большим радиусом закругления | • |
| То же с радиусом от 2 до 8 диаметров | 10 |
| То же с радиусом закругления, равным 1 диаметру | 20 |
| Угольник стандартный | 30 |
| Тройники | 30 |
| » | 40 |
| » | 50 |
| » | 60 |
| Задвижка открытая | 11 |
| Сальниковый компенсатор | 10 |
| П-образный компенсатор при угольниках | 120 |
| То же при коленах с радиусом закругления, равным 1 диаметру | 80 |
| То же при коленах с радиусом от 2 до 8 диаметров | 40 |
| Лирообразный компенсатор | 100 |
| Фильтр односетчатый для тёмных нефтепродуктов, незагрязнённый | 100 |
| Фильтр односетчатый для светлых нефтепродуктов, незагрязнённый | 75 |
| Обратный клапан | 75 |

ПРИНЦИП НАЛОЖЕНИЯ ПОТЕРЬ

Сущность этого принципа заключается в том, что полная потеря напора равняется арифметической сумме потерь, вызванных каждым сопротивлением в отдельности.

Слагаемые полного гидравлического сопротивления для потока сжимаемой или несжимаемой жидкости по Н. И. Белокопы [3]

$$s = s^I + s^{II} + s^{III} + s^{IV} + s^V = \xi_{np} \frac{vu^2}{2g}, \quad (168)$$

где v, u — удельный объём (v) и весовая скорость потока (u) в руководящем сечении (f_A):

$$v = v_A = \frac{1}{\gamma_A}; \quad (168a)$$

$$u = u_A = \frac{G}{f_A}; \quad (168б)$$

G — весовой секундный расход;
ξ_{np} — приведённый коэффициент сопротивления:

$$\xi_{np} = \xi^I + \xi^{II} + \xi^{III} + \xi^{IV} + \xi^V, \quad (168в)$$

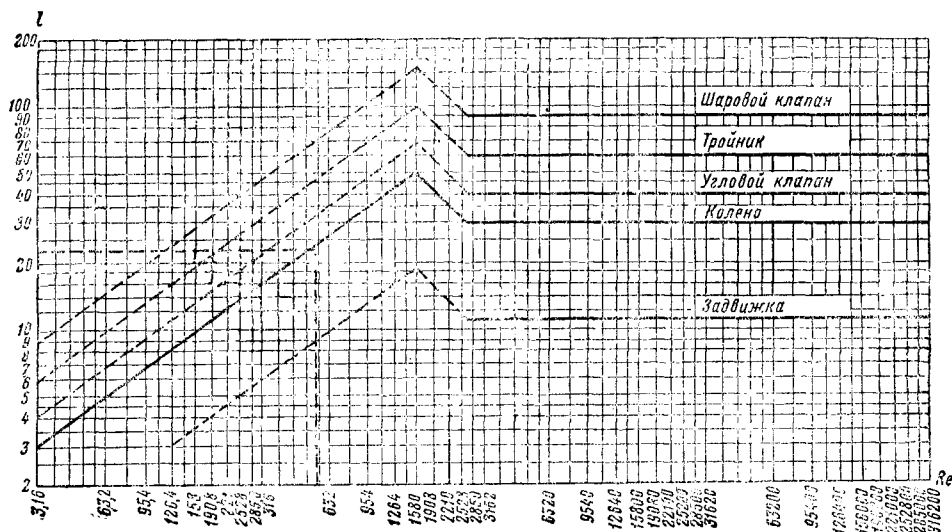
s^{I-V}, ξ^{I-V} — слагаемые полного сопротивления и приведённого коэффициента сопротивления (см. табл. 37а).

МЕСТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ

Все вышеприведённые значения коэффициентов ξ справедливы только для турбулентных потоков жидкости, для которых не зависит от числа Re . Коэффициенты ξ

местных сопротивлений в ламинарном потоке, наоборот, являются функциями числа Re . Эквивалентные длины местных сопротивлений ламинарных потоков могут быть найдены по диаграмме (фиг. 45).

Для того чтобы определить эквивалентную длину местного сопротивления фитинга, не помещённого на диаграмме, необходимо взять соответствующую длину для турбулентного режима и через полученную точку провести ломаную линию, параллельную кривым, имеющимся на диаграмме.



Фиг. 45

Таблица 37а

Слагаемые полного сопротивления и приведённого коэффициента сопротивления

| Группа сопротивлений | Слагаемые полного сопротивления системы (по участкам) | Слагаемые приведённого коэффициента сопротивления системы |
|---|--|---|
| Местные сопротивления, определяемые по наименьшим сечениям (f_{\min}) _i | $s^I = \sum \left(\frac{v_{i \max}}{2g} \right)_i$ | $\xi^I = \sum \xi_i \frac{v_i}{v} \frac{(u_{\max}^2)_i}{u^2}$ |
| Сопротивления трения | $s^{II} = \sum \left(\frac{v_{cp} u^2}{2g} \right)_i \cdot \left(\frac{\lambda H}{4f} \right)_i$ | $\xi^{II} = \sum \left(\frac{v_{cp}}{v} \right)_i \cdot \frac{u_i^2}{u^2} \left(\frac{\lambda H}{4f} \right)_i$ |
| Сопротивления от изменения высоты центра тяжести потока (геометрическая разность высот) | $s^{III} = \sum \left(\frac{\Delta h}{v_{cp}} \right)_i$ | $\xi^{III} = \frac{2g}{u^2} \sum \left(\frac{\Delta h}{v_{cp}} \right)_i$ |
| Сопротивления от изменения удельного объёма жидкости (v_i' и v_i'' — удельные объёмы жидкости на выходе и входе участка) | $s^{IV} = \sum \frac{v_i^2}{2g} (v'' - v')_i$ | $\xi^{IV} = \sum \frac{(v'' - v')_i}{v} \cdot \frac{u_i^2}{u^2}$ |
| Разность граничных динамических напоров (конечного и начального) | $s^V = \sum \frac{(v u^2)_2}{2g} - \frac{(v u^2)_1}{2g}$ | $\xi^V = \frac{(v u^2)_2 - (v u^2)_1}{u^2}$ |

РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ

ФОРМУЛА ШЕЗИ

Равномерное движение жидкости в открытом русле возможно только при соблюдении следующих условий:

- 1) постоянства расхода ($Q = \text{const}$);
- 2) постоянства площади поперечного сечения ($\omega = \text{const}$);
- 3) постоянства гидравлического уклона i (в данном случае $i = \sin \alpha$ — уклон дна);
- 4) постоянства степени шероховатости смоченной поверхности по длине русла;
- 5) отсутствия местных сопротивлений.

Расчётное уравнение равномерного движения турбулентного потока жидкости

$$Q = \omega C \sqrt{Ri} \text{ или } Q = K_0 \sqrt{Ri}, \quad (169)$$

где $K_0 = \omega C \sqrt{R}$ — модуль расхода — расход в русле заданного живого сечения при гидравлическом уклоне, равном единице;

$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$ — коэффициент Шези — разрывной множитель, учитывающий влияние шероховатости стенок русла, размеров и формы живого сечения на величину средней скорости потока;

R — гидравлический радиус;

λ — коэффициент гидравлического сопротивления;

g — ускорение силы тяжести.

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФИЦИЕНТА ШЕЗИ

а) Формула Базена (гидравлический радиус — R в м):

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}}, \quad (170)$$

где γ — коэффициент шероховатости (табл. 38).

Таблица 38

Коэффициент шероховатости γ различных стенок

| Род стенок | Коэффициент шероховатости |
|---|---------------------------|
| Очень гладкие стенки (строганные доски, гладкая цементная штукатурка и т. д.) | 0,06 |
| Гладкие стенки (нестроганные доски, тёсовая и кирпичная кладка, бетонные и чугунные трубы, весьма хорошая бетонировка и др.) | 0,16 |
| Негладкие стенки (хорошая бутровая кладка, посредственная бетонировка) | 0,46 |
| Промежуточная категория (грубая бутровая кладка, весьма грубая бетонировка по скале, замощение булыжниками, стенки в плотных земляных грунтах, притом весьма хорошо содержимых, стенки, чисто высеченные в скале) | 0,85 |
| Земляные стенки в обычном состоянии (сюда же мощёные, но несколько заросшие стенки, и т. п.) | 1,30 |
| Земляные русла, оказывающие сильное сопротивление при плохом содержании, значительных водорослях, скальным с валунами или крупногалечном дне и пр. | 1,75 ¹ |

В табл. 39 приведены значения коэффициента C , подсчитанные по формуле Базена.

Таблица 39

Коэффициент C по формуле Базена

| γ в м | 0,06 | 0,16 | 0,46 | 0,85 | 1,30 | 1,75 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| 0,05 | 68,5 | 50,7 | 28,5 | 18,1 | 12,8 | 9,9 |
| 0,06 | 69,8 | 52,6 | 30,2 | 19,4 | 13,8 | 10,7 |
| 0,07 | 70,9 | 54,2 | 31,7 | 20,6 | 14,7 | 11,4 |
| 0,08 | 71,8 | 55,6 | 33,1 | 21,7 | 15,5 | 12,1 |
| 0,09 | 72,5 | 56,7 | 34,4 | 22,7 | 16,3 | 12,7 |
| 0,10 | 73,1 | 57,7 | 35,5 | 23,6 | 17,0 | 13,3 |
| 0,11 | 73,6 | 58,7 | 36,5 | 24,4 | 17,7 | 13,9 |
| 0,12 | 74,1 | 59,5 | 37,4 | 25,2 | 18,3 | 14,4 |
| 0,13 | 74,6 | 60,2 | 38,2 | 25,9 | 18,9 | 14,9 |
| 0,14 | 75,0 | 60,9 | 39,0 | 26,7 | 19,4 | 15,3 |
| 0,15 | 75,3 | 61,5 | 39,7 | 27,2 | 19,9 | 15,8 |
| 0,16 | 75,6 | 62,1 | 40,5 | 27,8 | 20,4 | 16,2 |
| 0,17 | 75,9 | 62,7 | 41,2 | 28,4 | 20,9 | 16,6 |
| 0,18 | 76,2 | 63,2 | 41,8 | 29,0 | 21,4 | 17,0 |
| 0,19 | 76,5 | 63,6 | 42,4 | 29,5 | 21,8 | 17,3 |
| 0,20 | 76,7 | 64,1 | 42,9 | 30,0 | 22,3 | 17,7 |
| 0,21 | 76,9 | 64,5 | 43,5 | 30,5 | 22,7 | 18,1 |
| 0,22 | 77,1 | 64,9 | 44,0 | 30,9 | 23,1 | 18,4 |
| 0,23 | 77,3 | 65,2 | 44,4 | 31,4 | 23,4 | 18,7 |
| 0,24 | 77,5 | 65,5 | 44,8 | 31,8 | 23,8 | 19,0 |
| 0,25 | 77,6 | 65,9 | 45,3 | 32,2 | 24,2 | 19,3 |
| 0,26 | 77,8 | 66,2 | 45,7 | 32,6 | 24,5 | 19,6 |
| 0,27 | 78,0 | 66,5 | 46,1 | 33,0 | 24,8 | 19,9 |
| 0,28 | 78,1 | 66,8 | 46,5 | 33,4 | 25,2 | 20,2 |
| 0,29 | 78,3 | 67,0 | 46,9 | 33,7 | 25,5 | 20,5 |
| 0,30 | 78,4 | 67,3 | 47,3 | 34,1 | 25,8 | 20,7 |
| 0,31 | 78,5 | 67,6 | 47,6 | 34,3 | 26,1 | 21,0 |
| 0,32 | 78,6 | 67,8 | 47,9 | 34,7 | 26,4 | 21,2 |
| 0,33 | 78,8 | 68,2 | 48,2 | 35,1 | 26,7 | 21,5 |
| 0,34 | 78,9 | 68,3 | 48,5 | 35,4 | 26,9 | 21,7 |
| 0,35 | 79,0 | 68,4 | 48,8 | 35,7 | 27,2 | 22,0 |
| 0,36 | 79,1 | 68,6 | 49,2 | 36,0 | 27,5 | 22,2 |
| 0,37 | 79,2 | 68,8 | 49,5 | 36,3 | 27,7 | 22,4 |
| 0,38 | 79,2 | 69,0 | 49,8 | 36,6 | 28,0 | 22,7 |
| 0,39 | 79,3 | 69,2 | 50,1 | 36,8 | 28,2 | 22,9 |
| 0,40 | 79,4 | 69,4 | 50,4 | 37,1 | 28,5 | 23,1 |
| 0,41 | 79,5 | 69,6 | 50,6 | 37,4 | 28,7 | 23,3 |
| 0,42 | 79,6 | 69,7 | 50,9 | 37,6 | 28,9 | 23,5 |
| 0,43 | 79,7 | 69,9 | 51,1 | 37,9 | 29,2 | 23,7 |
| 0,44 | 79,7 | 70,1 | 51,4 | 38,1 | 29,4 | 23,9 |
| 0,45 | 79,8 | 70,2 | 51,6 | 38,4 | 29,6 | 24,1 |
| 0,46 | 79,9 | 70,4 | 51,8 | 38,6 | 29,8 | 24,3 |
| 0,47 | 80,0 | 70,5 | 52,0 | 38,8 | 30,0 | 24,5 |
| 0,48 | 80,0 | 70,6 | 52,3 | 39,1 | 30,2 | 24,7 |
| 0,49 | 80,1 | 70,8 | 52,5 | 39,3 | 30,4 | 24,8 |
| 0,50 | 80,2 | 70,9 | 52,7 | 39,5 | 30,6 | 25,0 |
| 0,55 | 80,4 | 71,5 | 53,7 | 40,5 | 31,6 | 25,9 |
| 0,60 | 80,7 | 72,1 | 54,6 | 41,4 | 32,5 | 26,7 |
| 0,65 | 80,9 | 72,6 | 55,4 | 42,3 | 33,3 | 27,4 |
| 0,70 | 81,1 | 73,0 | 56,1 | 43,1 | 34,1 | 28,1 |
| 0,75 | 81,3 | 73,4 | 56,8 | 43,9 | 34,8 | 28,8 |
| 0,80 | 81,5 | 73,8 | 57,4 | 44,6 | 35,5 | 29,4 |
| 0,85 | 81,7 | 74,1 | 58,0 | 45,2 | 36,1 | 30,0 |
| 0,90 | 81,8 | 74,4 | 58,6 | 45,9 | 36,7 | 30,6 |
| 0,95 | 81,9 | 74,7 | 59,1 | 46,5 | 37,3 | 31,1 |
| 1,00 | 82,0 | 75,0 | 59,6 | 47,0 | 37,8 | 31,6 |
| 1,10 | 82,2 | 75,4 | 60,5 | 48,0 | 38,8 | 32,6 |
| 1,20 | 82,4 | 75,9 | 61,3 | 48,9 | 39,7 | 33,5 |
| 1,30 | 82,6 | 76,3 | 62,0 | 49,8 | 40,6 | 34,3 |
| 1,40 | 82,8 | 76,6 | 62,6 | 50,6 | 41,4 | 35,1 |
| 1,50 | 82,9 | 76,9 | 63,2 | 51,3 | 42,2 | 35,8 |
| 1,60 | 83,0 | 77,2 | 63,8 | 52,0 | 42,9 | 36,5 |
| 1,70 | 83,1 | 77,5 | 64,3 | 52,6 | 43,6 | 37,1 |
| 1,80 | 83,2 | 77,7 | 64,8 | 53,2 | 44,2 | 37,7 |
| 1,90 | 83,3 | 77,9 | 65,2 | 53,8 | 44,8 | 38,3 |
| 2,00 | 83,4 | 78,1 | 65,6 | 54,3 | 45,3 | 38,9 |
| 2,20 | 83,6 | 78,5 | 66,4 | 55,3 | 46,4 | 39,9 |
| 2,40 | 83,7 | 78,8 | 67,1 | 56,2 | 47,3 | 40,8 |
| 2,60 | 83,8 | 79,1 | 67,7 | 57,0 | 48,1 | 41,7 |
| 2,80 | 83,9 | 79,4 | 68,2 | 57,7 | 48,9 | 42,5 |
| 3,00 | 84,0 | 79,6 | 68,7 | 58,3 | 49,7 | 43,3 |
| 3,20 | 84,1 | 79,8 | 69,2 | 58,9 | 50,4 | 44,0 |
| 3,40 | 84,2 | 80,0 | 69,6 | 59,5 | 51,0 | 44,6 |
| 3,60 | 84,3 | 80,2 | 70,0 | 60,1 | 51,6 | 45,2 |
| 3,80 | 84,4 | 80,4 | 70,4 | 60,6 | 52,2 | 45,8 |
| 4,00 | 84,4 | 80,5 | 70,7 | 61,0 | 52,7 | 46,4 |
| 4,50 | 84,6 | 80,9 | 71,5 | 62,1 | 53,9 | 47,6 |
| 5,00 | 84,7 | 81,2 | 72,1 | 63,0 | 55,0 | 48,8 |
| 5,50 | 84,8 | 81,4 | 72,7 | 63,8 | 56,0 | 49,8 |
| 6,00 | 84,9 | 81,6 | 73,2 | 64,6 | 56,8 | 50,7 |

¹ Это значение не является предельно наибольшим.

б) Формула Гангилье-Куттера:

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{i}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{i}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}}, \quad (171)$$

где n — коэффициент шероховатости (табл. 40);
 i — уклон дна;
 R — гидравлический радиус в м.

Таблица 40

Значения n и $\frac{1}{n}$ (по Гангилье-Куттеру)

| Род стенки | n | $\frac{1}{n}$ |
|---|--------|---------------|
| Струганные доски. Гладкая цементная штукатурка | 0,010 | 100 |
| Цементная штукатурка с примесью одной трети песка | 0,011 | 90,9 |
| Неструганные доски, хорошо пригнанные | 0,012 | 83,3 |
| Бутовая кладка с облицовкой тесаными камнями | | |
| Тщательная бетонировка с железнением. Хорошая кирпичная облицовка | 0,013 | 76,9 |
| Бетонированные каналы в хороших условиях | 0,014 | 71,4 |
| Каменная кладка с полуклестой теской. Кирпичная кладка | 0,015 | 66,7 |
| Бутовая кладка без облицовки. Бетон среднего качества | 0,017 | 58,8 |
| Мошенье булыжником. Плотные грунты в естественном состоянии. Каналы в скале | 0,020 | 50 |
| Скальные грунты при посредственной сбрежке скалы. Лёссовые и гравелистые грунты | 0,0225 | 44,4 |
| Неукрепленные земляные русла в обычном их состоянии | 0,025 | 40 |
| Неукрепленные земляные русла, плохо содержимые (заросли) или оказывающие значительное сопротивление течению (камни и т. п.) | 0,030 | 33,3 |
| Неукрепленные земляные русла с неправильным профилем, с большим количеством водорослей, камней и т. п. | 0,035 | 28,6 |
| Неукрепленные земляные русла, находящиеся в исключительно плохих условиях | 0,040 | 25,0 |

При значениях $i > 0,0005$ следует пользоваться сокращённой формулой:

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n}}{1 + \frac{23n}{\sqrt{R}}}. \quad (172)$$

В табл. 41 даны значения коэффициента C по Гангилье-Куттеру (R в м).

в) Формула Маннинга:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (173)$$

где n — коэффициент шероховатости; значения его те же, что и в формуле Гангилье-Куттера.

Таблица 41
Коэффициент C по формуле Гангилье-Куттера

| n | R в м | Уклон | | | | | | |
|-------|------------|----------|----------|--------|--------|--------|-------|------|
| | | 0,000025 | 0,000050 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0004 | 0,001 | 0,01 |
| 0,010 | 0,05 | 38 | 44 | 51 | 54 | 55 | 57 | 58 |
| | 0,10 | 49 | 56 | 61 | 65 | 68 | 70 | 71 |
| | 0,20 | 63 | 70 | 74 | 77 | 78 | 79 | 80 |
| | 0,30 | 72 | 77 | 81 | 84 | 85 | 86 | 88 |
| | 0,50 | 83 | 86 | 88 | 90 | 91 | 91 | 91 |
| | 1,00 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 2,00 | 115 | 111 | 109 | 107 | 106 | 105 | 105 |
| | 3,00 | 124 | 117 | 113 | 111 | 110 | 109 | 108 |
| | 5,00 | 134 | 123 | 118 | 115 | 113 | 112 | 111 |
| | 15,00 | 151 | 135 | 125 | 121 | 118 | 117 | 116 |
| 0,013 | 0,05 | 28 | 31 | 35 | 33 | 40 | 41 | 42 |
| | 0,10 | 36 | 41 | 44 | 47 | 49 | 50 | 51 |
| | 0,20 | 46 | 50 | 53 | 56 | 58 | 59 | 59 |
| | 0,30 | 53 | 57 | 60 | 63 | 64 | 64 | 65 |
| | 0,50 | 62 | 65 | 67 | 69 | 69 | 70 | 70 |
| | 1,00 | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 |
| | 2,00 | 90 | 87 | 85 | 84 | 83 | 82 | 82 |
| | 3,00 | 99 | 94 | 89 | 88 | 87 | 86 | 85 |
| | 5,00 | 108 | 100 | 93 | 91 | 90 | 89 | 88 |
| | 15,00 | 125 | 114 | 102 | 98 | 96 | 94 | 92 |
| 0,017 | 0,05 | 19 | 22 | 24 | 26 | 28 | 29 | 29 |
| | 0,10 | 25 | 29 | 32 | 34 | 35 | 36 | 36 |
| | 0,20 | 34 | 37 | 39 | 41 | 42 | 42 | 43 |
| | 0,30 | 40 | 43 | 45 | 46 | 47 | 47 | 48 |
| | 0,50 | 47 | 49 | 50 | 51 | 51 | 52 | 52 |
| | 1,00 | 58 | 58 | 58 | 58 | 58 | 58 | 58 |
| | 2,00 | 71 | 69 | 67 | 66 | 65 | 64 | 64 |
| | 3,00 | 78 | 74 | 71 | 70 | 69 | 68 | 68 |
| | 5,00 | 87 | 79 | 75 | 73 | 72 | 71 | 70 |
| | 15,00 | 105 | 90 | 83 | 79 | 77 | 76 | 75 |
| 0,020 | 0,05 | 15 | 18 | 20 | 21 | 23 | 23 | 24 |
| | 0,10 | 21 | 23 | 25 | 28 | 29 | 29 | 30 |
| | 0,20 | 28 | 30 | 32 | 34 | 35 | 36 | 36 |
| | 0,30 | 33 | 35 | 37 | 38 | 39 | 40 | 40 |
| | 0,50 | 40 | 41 | 42 | 43 | 43 | 44 | 44 |
| | 1,00 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| | 2,00 | 61 | 59 | 57 | 56 | 55 | 55 | 55 |
| | 3,00 | 69 | 64 | 61 | 59 | 58 | 58 | 58 |
| | 5,00 | 76 | 70 | 66 | 63 | 62 | 61 | 61 |
| | 15,00 | 94 | 81 | 74 | 70 | 68 | 67 | 66 |
| 0,025 | 0,05 | 12 | 13 | 15 | 16 | 17 | 18 | 18 |
| | 0,10 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 22 |
| | 0,20 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 27 |
| | 0,30 | 26 | 28 | 29 | 30 | 30 | 31 | 31 |
| | 0,50 | 31 | 32 | 33 | 34 | 34 | 35 | 35 |
| | 1,00 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | 2,00 | 50 | 48 | 47 | 46 | 45 | 45 | 45 |
| | 3,00 | 56 | 53 | 51 | 49 | 48 | 48 | 47 |
| | 5,00 | 64 | 59 | 54 | 53 | 52 | 51 | 50 |
| | 15,00 | 81 | 71 | 63 | 59 | 57 | 56 | 55 |
| 0,030 | 0,05 | 10 | 11 | 12 | 13 | 13 | 14 | 14 |
| | 0,10 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 18 |
| | 0,20 | 18 | 19 | 19 | 20 | 21 | 22 | 22 |
| | 0,30 | 21 | 22 | 23 | 24 | 24 | 25 | 25 |
| | 0,50 | 25 | 26 | 27 | 27 | 28 | 28 | 29 |
| | 1,00 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| | 2,00 | 42 | 41 | 40 | 40 | 39 | 38 | 38 |
| | 3,00 | 48 | 45 | 43 | 42 | 42 | 41 | 41 |
| | 5,00 | 56 | 51 | 47 | 45 | 44 | 43 | 43 |
| | 15,00 | 72 | 62 | 55 | 52 | 51 | 49 | 48 |
| 0,035 | 0,05 | 8 | 9 | 9 | 10 | 10 | 11 | 11 |
| | 0,10 | 11 | 12 | 12 | 13 | 13 | 14 | 14 |
| | 0,20 | 15 | 16 | 16 | 17 | 17 | 18 | 18 |
| | 0,30 | 18 | 19 | 19 | 20 | 20 | 21 | 21 |
| | 0,50 | 22 | 23 | 23 | 23 | 24 | 24 | 24 |
| | 1,00 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 |
| | 2,00 | 36 | 35 | 34 | 34 | 33 | 33 | 33 |
| | 3,00 | 42 | 40 | 38 | 37 | 36 | 36 | 36 |
| | 5,00 | 49 | 45 | 43 | 42 | 41 | 40 | 39 |
| | 15,00 | 65 | 56 | 51 | 47 | 45 | 44 | 43 |
| 0,040 | 0,05 | 6 | 7 | 7 | 8 | 8 | 9 | 9 |
| | 0,10 | 9 | 10 | 11 | 11 | 12 | 12 | 12 |
| | 0,20 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 16 | 16 |
| | 0,30 | 15 | 16 | 17 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| | 0,50 | 19 | 19 | 20 | 20 | 21 | 21 | 21 |
| | 1,00 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| | 2,00 | 32 | 31 | 31 | 30 | 30 | 29 | 29 |
| | 3,00 | 37 | 35 | 34 | 33 | 32 | 32 | 32 |
| | 5,00 | 44 | 41 | 39 | 38 | 37 | 36 | 35 |
| | 15,00 | 59 | 52 | 46 | 43 | 42 | 41 | 40 |

В табл. 42 даны значения коэффициента C по Маннингу.

Таблица 42

Коэффициент C по формуле Маннинга

| R в м \ n | 0,010 | 0,013 | 0,017 | 0,020 | 0,025 | 0,030 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,10 | 68,1 | 52,4 | 33,5 | 34,0 | 27,2 | 22,7 |
| 0,12 | 70,2 | 54,1 | 40,7 | 35,1 | 28,1 | 23,4 |
| 0,15 | 72,8 | 56,1 | 42,2 | 36,4 | 29,1 | 24,2 |
| 0,20 | 76,5 | 58,9 | 44,4 | 38,2 | 30,6 | 25,5 |
| 0,30 | 81,8 | 63,0 | 47,4 | 40,9 | 32,7 | 27,3 |
| 0,40 | 85,8 | 66,1 | 49,8 | 42,9 | 34,3 | 28,6 |
| 0,60 | 91,8 | 70,7 | 53,2 | 45,9 | 36,7 | 30,6 |
| 0,80 | 96,4 | 74,2 | 55,9 | 48,2 | 38,6 | 32,1 |
| 1,00 | 100,0 | 77,0 | 58,0 | 50,0 | 40,0 | 33,3 |
| 1,20 | 103,1 | 79,4 | 59,8 | 51,5 | 41,2 | 34,4 |
| 1,40 | 105,7 | 81,4 | 61,3 | 52,7 | 42,3 | 35,2 |
| 1,60 | 108,1 | 83,2 | 62,6 | 54,0 | 43,2 | 36,0 |
| 1,80 | 110,1 | 84,8 | 63,9 | 55,1 | 44,1 | 36,7 |
| 2,00 | 112,0 | 86,2 | 65,0 | 56,0 | 44,8 | 37,3 |
| 2,50 | 116,5 | 89,7 | 67,6 | 58,2 | 46,6 | 38,8 |
| 3,00 | 120,0 | 92,4 | 69,6 | 60,0 | 48,0 | 40,0 |
| 3,50 | 123,2 | 94,9 | 71,5 | 61,6 | 49,3 | 41,1 |
| 4,00 | 126,0 | 97,0 | 73,1 | 63,0 | 50,4 | 42,0 |
| 5,00 | 131,0 | 100,8 | 76,0 | 65,5 | 52,4 | 43,7 |

КАНАЛЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИ НАИВЫГОДНЕЙШЕГО СЕЧЕНИЯ

Гидравлически наивыгоднейшим называется такое сечение канала, которое при той же площади способно пропустить наибольший расход.

Из формулы Шези (169) следует, что расход Q будет максимальным при $R = \frac{\omega}{\chi} = \max$, т. е. гидравлически наивыгоднейшее сечение должно иметь минимальный смоченный периметр.

Из всех равновеликих фигур наименьший периметр имеет круг, который и будет являться наивыгоднейшим сечением. Из остальных видов профилей наивыгоднейшими будут те, которые возможно ближе приближаются по своему очертанию к полукругу: для вертикальных стенок — полуквадрат, для наклонных — половина правильного шестиугольника. При углах откоса $\beta < 60^\circ$ (практически встречаются наиболее часто) наивыгоднейшим профилем будет трапеция. При этом наивыгоднейшее соотношение между шириной b и глубиной h определяется равенством

$$b = 2h(\sqrt{1+m^2} - m), \quad (176)$$

где $m = \operatorname{ctg} \beta$ — коэффициент крутизны откоса.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ КАНАЛОВ

В практике наиболее распространены каналы трапециoidalной формы, которые вклю-

г) Формула Форхгеймера:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (174)$$

где n — коэффициент шероховатости; значения его те же, что и в формуле Гангилы-Куттера (табл. 40).

д) Формула Павловского:

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (175)$$

где

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,10)$$

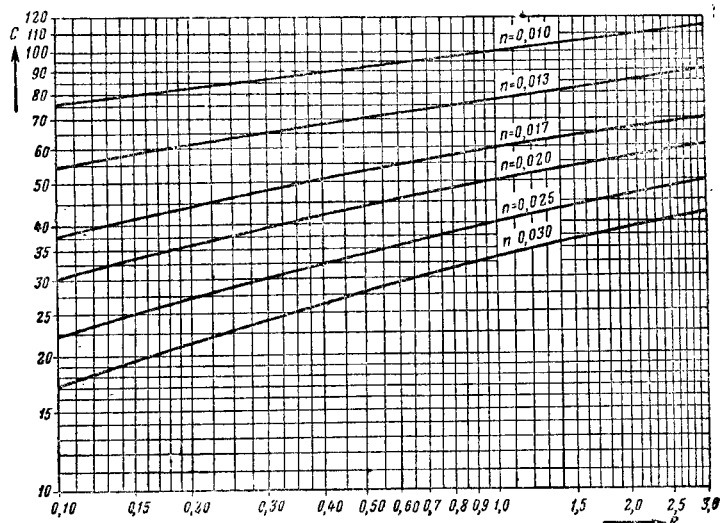
или приближённо:

$$\text{при } R < 1,0 \text{ м } y \approx 1,5\sqrt{n};$$

$$\text{при } R > 1,0 \text{ м } y \approx 1,3\sqrt{n}.$$

Формула предложена для гидравлических радиусов, лежащих в пределах $0,1 \leq R \leq 3,0$ м, и степени шероховатости $n = 0,011 \div 0,040$.

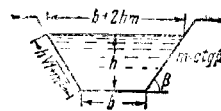
На фиг. 46 даны значения коэффициента C по Павловскому.



Фиг. 46

чают в себя как частные случаи каналы треугольного (при $b=0$) и прямоугольного (при $m=0$) сечений.

Для этих каналов (фиг. 47):



Фиг. 47

площадь живого сечения

$$\omega = (b + mh)h;$$

смоченный периметр

$$\chi = b + 2h\sqrt{1+m^2}$$

гидравлический радиус

$$R = \frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1+m^2}}$$

} (177)

1-я задача. Дано: i , b , h и $m = \operatorname{ctg} \beta$; определить Q .

Из формул (177) находим ω , χ , R и по формуле Шези определяем Q .

2-я задача. Дано: Q , b , h и m ; определить i :

$$i = \frac{Q^2}{C^2 R \omega^2},$$

где R и ω определены по формулам (177).

3-я задача. Дано: Q , i и m ; определить h и b .

Задача имеет бесчисленное множество решений. Исходя из технических соображений, задаются величиной $x = \frac{b}{h}$. Тогда

$$h = \left(\frac{Q}{A} \right)^{2/3},$$

где

$$A = \frac{\sqrt{i}}{n} \frac{(x + m)^{5/2}}{(x + 2\sqrt{1+m^2})^{3/2}}. \quad (178)$$

Для нахождения глубины потока в заданном русле, когда известны ширина по дну b и крутизна откоса m , пользуются методом Бахметева. Этот метод основан на том, что у подобных русел (у которых углы β и отношения $\frac{b}{h}$ одинаковы) модули расхода K относятся между собой, как некоторая степень глубин:

$$\frac{K_2}{K_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^p \quad \text{или} \quad \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^{\frac{1}{p}} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^x, \quad (179)$$

где $K = \omega C \sqrt{R}$;

x — гидравлический показатель русла.

Бахметев допускает, что соотношение (179) может быть распространено не только на подобные русла, но и на данное русло при разных глубинах его наполнения.

Для последнего случая равенство (179) неточное; поэтому при вычислении x не следует брать величин h_1 и h_2 , сильно различающихся между собой.

ДОПУСКАЕМЫЕ СКОРОСТИ

Верхний предел допускаемых скоростей ограничивается способностью материала стенок противостоять размыву, нижний — выпадением взвешенных в жидкости частиц.

Для определения минимальной скорости v_{\min} (предохраняющей от заилиenia) пользуются обычно следующими эмпирическими формулами:

$$v_{\min} = a \cdot h^{0,64}; \quad (180)$$

$$v_{\min} = a' \sqrt{R}. \quad (181)$$

В приведённых формулах:

h — глубина наполнения канала в м;

R — гидравлический радиус в м;

a , a' — некоторые коэффициенты, значения которых приведены в табл. 42 а.

Формула Гончарова:

$$p = \frac{0,0535}{h} \left(\frac{v_{\min}}{v_0 h^{0,2}} \right)^4 \left(1 - \frac{h^{0,2}}{v_{\min}} \right), \quad (182)$$

где p — весовое содержание фракций наносов крупнее 0,005 мм в промиллях;

v_0 м/сек — скорость, при которой происходит осаждение наносов данной крупности при глубине потока $h = 1$ м;

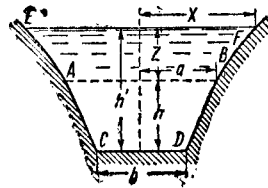
v_{\min} — минимальная скорость.

В табл. 43 даны значения v_{\min} , вычисленные по формуле Гончарова.

В табл. 44 приведены допускаемые средние скорости в каналах («Стандарты, нормы и технические условия проектирования гидротехнических сооружений гидростанций», сборник № 1, 1939).

КАНАЛЫ, НЕ МЕНЯЮЩИЕ СВОЕЙ СКОРОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГЛУБИНЫ НАПОЛНЕНИЯ

Для получения неизменной скорости при различной глубине наполнения (предупреждает заилиение и размывание) канал должен иметь профиль, при котором гидравлический



Фиг. 48

радиус не зависит от величины h . Уравнение кривой откоса такого канала (фиг. 48) имеет вид:

$$Z = R \ln \frac{x + \sqrt{x^2 - R^2}}{a + \sqrt{a^2 - R^2}}. \quad (183)$$

Практически ввиду отсутствия данных о величине коэффициента Шези C для такого профиля каналу придают форму, изображённую на фиг. 49.

Таблица 42а
Коэффициенты a и a'

| Характеристика наносов | a | a' |
|--|-----------|-----------|
| Крупные песчано-илистые наносы | 0,6—0,71 | 0,65—0,77 |
| Средние песчано-илистые наносы | 0,54—0,57 | 0,58—0,64 |
| Мелкие наносы | 0,39—0,41 | 0,41—0,45 |
| Очень мелкие наносы | 0,34—0,37 | 0,37—0,41 |

Таблица 43
Значения минимальных скоростей
(по Гончарову)

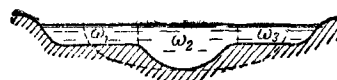
| Состав взвешенных наносов | Средняя глубина в м | При весовом содержании фракций наносов крупнее 0,005 мм в промиллях | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0,1 | 0,5 | 1,0 | 2,5 | 5,0 | 7,5 | 10 | |
| | | Значения v_{\min} м/сек | | | | | | | |
| 0,25—0,05 мм | | 0,30 | 0,22 | 0,28 | 0,32 | 0,39 | 0,45 | 0,49 | 0,52 |
| 25% | | 0,60 | 0,28 | 0,37 | 0,43 | 0,52 | 0,60 | 0,66 | 0,70 |
| 0,05—0,005 мм | | 1,00 | 0,34 | 0,45 | 0,52 | 0,64 | 0,75 | 0,82 | 0,87 |
| 75% | | 1,50 | 0,39 | 0,54 | 0,62 | 0,76 | 0,89 | 0,97 | 1,04 |
| | | 2,00 | 0,44 | 0,60 | 0,70 | 0,86 | 1,01 | 1,10 | 1,18 |
| | | 2,50 | 0,48 | 0,66 | 0,77 | 0,94 | 1,11 | 1,22 | 1,30 |
| | | 3,00 | 0,51 | 0,71 | 0,83 | 1,02 | 1,20 | 1,32 | 1,41 |
| 0,25—0,05 мм | | 0,30 | 0,28 | 0,37 | 0,42 | 0,50 | 0,58 | 0,64 | 0,68 |
| 75% | | 0,60 | 0,36 | 0,48 | 0,55 | 0,67 | 0,78 | 0,85 | 0,91 |
| 0,05—0,005 мм | | 1,00 | 0,43 | 0,59 | 0,68 | 0,83 | 0,97 | 1,06 | 1,13 |
| 25% | | 1,50 | 0,51 | 0,69 | 0,80 | 0,98 | 1,15 | 1,26 | 1,35 |
| | | 2,00 | 0,57 | 0,78 | 0,91 | 1,11 | 1,31 | 1,43 | 1,53 |
| | | 2,50 | 0,61 | 0,86 | 0,99 | 1,22 | 1,44 | 1,57 | 1,69 |
| | | 3,00 | 0,66 | 0,92 | 1,07 | 1,32 | 1,55 | 1,70 | 1,82 |
| 1,0—0,25 мм | | 0,30 | 0,39 | 0,51 | 0,58 | 0,70 | 0,81 | 0,88 | 0,94 |
| 25% | | 0,60 | 0,50 | 0,67 | 0,76 | 0,93 | 1,08 | 1,18 | 1,26 |
| 0,25—0,05 мм | | 1,00 | 0,60 | 0,82 | 0,94 | 1,15 | 1,34 | 1,47 | 1,57 |
| 75% | | 1,50 | 0,70 | 0,96 | 1,11 | 1,36 | 1,59 | 1,75 | 1,87 |
| | | 2,00 | 0,78 | 1,08 | 1,26 | 1,54 | 1,80 | 1,98 | 2,12 |
| | | 2,50 | 0,85 | 1,19 | 1,38 | 1,69 | 1,99 | 2,18 | 2,33 |
| | | 3,00 | 0,92 | 1,28 | 1,49 | 1,83 | 2,15 | 2,36 | 2,53 |
| 1,0—0,25 мм | | 0,30 | 0,57 | 0,73 | 0,84 | 1,00 | 1,16 | 1,27 | 1,35 |
| 75% | | 0,60 | 0,72 | 0,96 | 1,10 | 1,34 | 1,56 | 1,70 | 1,82 |
| 0,25—0,05 мм | | 1,00 | 0,87 | 1,18 | 1,36 | 1,66 | 1,93 | 2,12 | 2,27 |
| 25% | | 1,50 | 1,01 | 1,39 | 1,61 | 1,96 | 2,30 | 2,52 | 2,70 |
| | | 2,00 | 1,13 | 1,56 | 1,81 | 2,12 | 2,60 | 2,86 | 3,06 |
| | | 2,50 | 1,23 | 1,71 | 1,99 | 2,44 | 2,87 | 3,15 | 3,37 |
| | | 3,00 | 1,32 | 1,85 | 2,15 | 2,64 | 3,10 | 3,41 | 3,65 |

Таблица 44
Допускаемые средние скорости в каналах

| Материал стенок каналов | Допускаемые средние скорости в м/сек | | | |
|---|--------------------------------------|---------|---------|-------------|
| | при средней глубине потока | | | |
| | 0,4 м | 1,0 м | 2,0 м | 3 м и более |
| Малоплотные глины и суглинки | 0,33 | 0,40 | 0,46 | 0,51 |
| Среднеплотные глины и суглинки | 0,70 | 0,85 | 0,95 | 1,1 |
| Плотные глины и суглинки | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,5 |
| Очень плотные глины и суглинки | 1,4 | 1,7 | 1,9 | 2,1 |
| Лёссовые грунты средней плотности в условиях закончившихся просадок | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,85 |
| Дёрн свежий плашмя | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 1 |
| „ „ в стенку | 1,5 | 1,8 | 2,0 | 2,2 |
| Свежие хворостяные покрытия и хворостяные крепления | 1,8 | 2,2 | 2,5 | 2,7 |
| Одиночная мостовая из булыжника размером сколо 20 см | 2,5—2,9 | 3,0—3,5 | 3,5—4,0 | 3,8—4,3 |
| Двойная мостовая из булыжника размером сколо 20 см | 3,1—3,6 | 3,7—4,3 | 4,3—5,0 | 4,6—5,4 |
| Габионы | до 4,2 | до 5,0 | до 5,7 | до 6,2 |
| Кладка из кирпича на цементном растворе | 1,6 | 2,0 | 2,3 | 2,5 |
| Бутовая кладка из слабых пород на цементном растворе | 2,9 | 3,5 | 4,0 | 4,4 |
| То же из средних пород | 5,8 | 7,0 | 8,1 | 8,7 |
| Кладка из клинкера на цементном растворе | 7,1 | 8,5 | 9,8 | 11 |
| Деревянные лотки | до 25 | | | |

СОСТАВНЫЕ ПРОФИЛИ

Составными профилями называются такие (фиг. 49), которые состоят из нескольких частей, различающихся своими гидравли-



Фиг. 49

скими характеристиками. Вследствие этого расчёт каналов составных профилей ведут по частям:

$$Q = v_1 \omega_1 + v_2 \omega_2 + v_3 \omega_3, \quad (184)$$

или

$$Q = C_1 \omega_1 \sqrt{R_1 i} + C_2 \omega_2 \sqrt{R_2 i} + C_3 \omega_3 \sqrt{R_3 i},$$

где $R_1 = \frac{\omega_1}{\chi_1}$; $R_2 = \frac{\omega_2}{\chi_2}$; $R_3 = \frac{\omega_3}{\chi_3}$.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ РУСЛА

Ввиду трудности определения коэффициента Шези C для естественных русел, коэффициенты шероховатости которых зависят от разнообразия конкретных случаев, величину средней скорости v принято рассчитывать по одной из следующих формул:

а) Величина средней скорости определяется в зависимости от средней глубины $h_{cp} = \frac{\omega}{B}$, где ω — площадь поперечного сечения русла;

B — ширина русла у поверхности воды в м.

$$\left. \begin{aligned} h_{cp} < 1,5 \text{ м}; \quad v &= 30,7 h_{cp} \sqrt{i} \\ 1,5 < h_{cp} < 6 \text{ м}; \quad v &= 34 h_{cp}^{1/2} \sqrt{i} \\ h_{cp} > 6 \text{ м}; \quad v &= \left(50,2 + \frac{h_{cp}}{2}\right) h_{cp}^{1/2} \sqrt{i} \end{aligned} \right\} \quad (185)$$

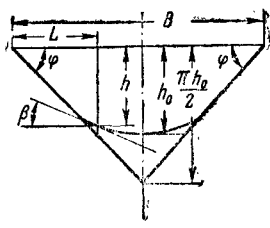
$$\text{б) } v = 8,05 R^{0,58} \cdot i^{0,3} \quad (\text{м/сек}), \quad (186)$$

где R — гидравлический радиус в м;

i — уклон свободной поверхности воды в русле.

УСТОЙЧИВЫЕ ПРОФИЛИ КАНАЛОВ

При пропуске воды с большой скоростью по размываемым естественным балкам и склонам русло приобретает чаще всего гиперболическую или параболическую форму (фиг. 50).



Фиг. 50

Максимальная ордината размыва

$$h_0 = \frac{v_e^2}{C^2 i}, \quad (187)$$

где

$v_e = v_g \sqrt[4]{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \varphi}}$ — скорость начала размыва (эрозии);
 v_g — допускаемая скорость при угле заложения откоса;
 φ — угол естественного откоса грунта в воде;
 β — переменный угол заложения откоса канала.

Живое сечение устойчивого русла определяется равенством:

$$\omega = \frac{2}{\pi} h_0 B. \quad (188)$$

Для параболического профиля

$$\omega = \frac{2}{3} h_0 B.$$

Скорость в устойчивом русле равна:

$$v = \sqrt{\frac{2g}{\lambda}} \left[1 + A \sqrt{\frac{2h_0}{\pi}} \right] \sqrt{\frac{2h_0 i}{\pi}}, \quad (189)$$

где A — некоторый коэффициент (при $R < 3$ м и $v < 3$ м/сек $A \approx 0,6$).

Расход в устойчивом русле:

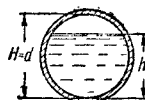
$$Q = 0,5 v_e (1 + 0,8 A \sqrt{h_0}) h_0 B. \quad (190)$$

ТЕЧЕНИЕ В ТРУБАХ С НЕЗАПОЛНЕННЫМ СЕЧЕНИЕМ

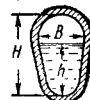
Расчётная формула

$$Q = K' \sqrt{i} = AK \sqrt{i}, \quad (191)$$

где A — коэффициент, зависящий от степени заполнения трубы $a = \frac{h}{H}$ (фиг. 51, 52). По



Фиг. 51



Фиг. 52

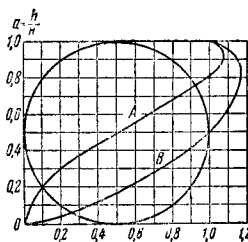
аналогии с формулой расхода скорость v определяется равенством

$$v = BW \sqrt{i}, \quad (192)$$

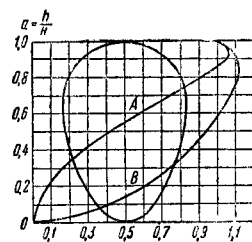
где $W = C \sqrt{R}$ — модуль скорости при сплошном заполнении трубы;

B — коэффициент, зависящий от степени заполнения трубы

$$a = \frac{h}{H}.$$



Фиг. 53



Фиг. 54

Величины A и B для круглых и овоидальных труб берутся в зависимости от a по графикам (фиг. 53 и 54).

Значения K и W для тех же труб приведены в табл. 45 и 46.

Таблица 45

Значения K и W в зависимости от диаметра для круглых труб

| d в м | K в л/сек | W в м/сек | d в м | K в л/сек | W в м/сек | d в м | K в л/сек | W в м/сек |
|---------|-------------|-------------|---------|-------------|-------------|---------|-------------|-------------|
| 0,3 | 908 | 12,86 | 0,75 | 11 270 | 25,52 | 1,2 | 30 660 | 35,07 |
| 0,4 | 2 028 | 16,12 | 0,8 | 13 490 | 26,81 | 1,3 | 49 090 | 37,04 |
| 0,5 | 3 718 | 19,09 | 0,9 | 18 310 | 28,94 | 1,4 | 60 100 | 39,05 |
| 0,6 | 5 132 | 21,70 | 1,0 | 24 350 | 30,99 | 1,5 | 72 470 | 41,02 |
| 0,7 | 9 340 | 24,27 | 1,1 | 31 480 | 33,09 | | | |

Таблица 46

Значения K и W в зависимости от H и b для овоидальных труб

| H в м | b в м | K в л/сек | W в м/сек | H в м | b в м | K в л/сек | W в м/сек |
|---------|---------|-------------|-------------|---------|---------|-------------|-------------|
| 0,45 | 0,3 | 1 523 | 14,43 | 1,50 | 1,0 | 42 690 | 34,43 |
| 0,60 | 0,4 | 3 314 | 18,03 | 1,65 | 1,1 | 51 430 | 37,00 |
| 0,75 | 0,5 | 6 119 | 21,31 | 1,80 | 1,2 | 64 390 | 39,92 |
| 0,9 | 0,6 | 10 000 | 24,19 | 1,95 | 1,3 | 78 580 | 40,12 |
| 1,05 | 0,7 | 15 210 | 27,03 | 2,10 | 1,4 | 92 190 | 42,68 |
| 1,20 | 0,8 | 21 550 | 29,34 | 2,25 | 1,5 | 115 800 | 44,81 |
| 1,35 | 0,9 | 29 930 | 32,17 | | | | |

ДВИЖЕНИЕ В ОТКРЫТЫХ КАНАЛАХ ПРИ ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ

а) Расход жидкости в зависимости от профиля сечения может быть выражен для широкого потока на плоскости (глубина потока h весьма мала по сравнению с шириной) по следующей формуле:

$$Q = \frac{1}{3} g i \frac{h^3}{\nu}, \quad (193)$$

где Q — расход жидкости;

i — уклон;

ν — кинематическая вязкость жидкости;

g — ускорение силы тяжести.

б) для прямоугольного сечения расход жидкости может быть подсчитан (по Чарному И. А.) по следующей формуле:

$$Q = 0,267 g \frac{i}{\nu} \cdot \frac{b^3 h^3}{b^2 + 4 h^2}, \quad (194)$$

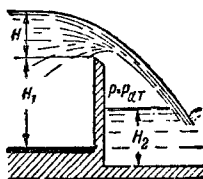
где b — ширина потока.

Остальные обозначения те же, что и в формуле (193).

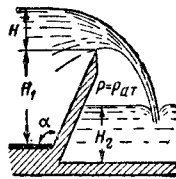
ВОДОСЛИВЫ

КЛАССИФИКАЦИЯ ВОДОСЛИВОВ

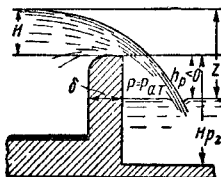
Водосливом называется преграда на пути потока жидкости, через которую последняя переливается.



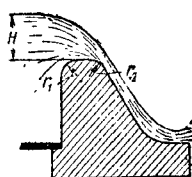
Фиг. 55. Водослив с тонкой вертикальной стенкой (вентилируемый; давление под струей p равно атмосферному)



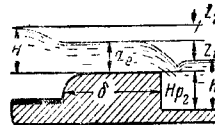
Фиг. 56. Водослив с тонкой наклонной стенкой (вентилируемый; давление под струей p равно атмосферному)



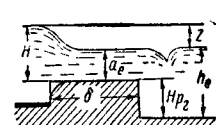
Фиг. 57. Водослив практического прямоугольного профиля (вентилируемый; давление под струей p равно атмосферному)



Фиг. 58. Водослив практического криволинейного профиля



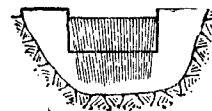
Фиг. 59. Водослив с широким порогом незатопленный



Фиг. 60. Водослив с широким порогом затопленный

и 56 показаны вертикальный и наклонный ($\alpha \neq 90^\circ$) водосливы с тонкой стенкой;

2) водосливы практических профилей: прямоугольный профиль (фиг. 57), криволинейный профиль (фиг. 58);



Фиг. 61. Водослив прямоугольный



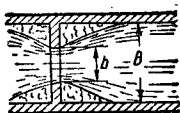
Фиг. 62. Водослив треугольный

3) водосливы с широким порогом (фиг. 59 и 60) — $b > (2 \div 3) H$. Движение переливающейся жидкости приобретает характер параллельно-струйного течения.

По форме сливного отверстия различают водосливы прямоугольные (фиг. 61), треугольные (фиг. 62) и т. д.

По конструкции водосливы могут различаться формой порога, сливного отверстия и ребра.

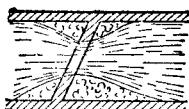
По форме ребра в плане и его расположению различают водосливы прямые (фиг. 63 и 64), косые (фиг. 65) и т. д.



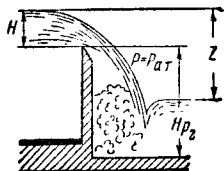
Фиг. 63. Водослив прямой с горизонтальным сжатием



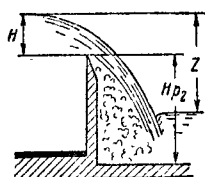
Фиг. 64. Водослив прямой без горизонтального сжатия



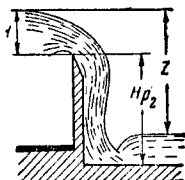
Фиг. 65. Водослив косой с горизонтальным сжатием



Фиг. 66. Водослив с тонкой вертикальной стенкой и с отжатой струей; давление под струей меньше атмосферного



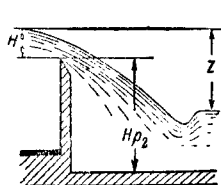
Фиг. 67. Водослив с тонкой вертикальной стенкой с затопленной снизу струей



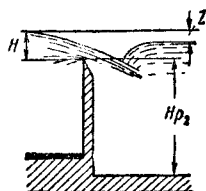
Фиг. 68. Водослив с тонкой вертикальной стенкой и с прилипшей струей

По характеру сливной струи и по виду сопряжения струи с нижним бьефом различают:

1) водосливы незатопленные: а) вентилируемые (фиг. 55—57), б) с отжатой струей (фиг. 66), в) с затопленной струей снизу (фиг. 67), г) с прилипшей струей (фиг. 68), д) с отогнутым прыжком (фиг. 69);



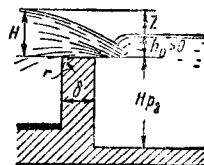
Фиг. 69. Водослив с тонкой вертикальной стенкой и с отогнутым прыжком



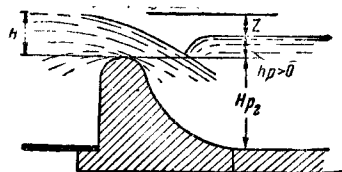
Фиг. 70. Водослив с тонкой вертикальной стенкой — затопленный

2) водосливы затопленные (фиг. 70, 71 и 72).

Различают водосливы и по степени бокового сжатия струи:



Фиг. 71. Водослив практического профиля — затопленный



Фиг. 72. Водослив практического профиля — затопленный

а) водосливы с горизонтальным сжатием (фиг. 63 и 65);
б) водосливы без горизонтального сжатия (фиг. 64).

РАСХОД ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ВОДОСЛИВ

Для определения расхода жидкости через водосливы всех типов служит общая расчётная формула

$$Q = mb \sqrt{2g} \left(H + \frac{a_0 v_0^2}{2g} \right)^{3/2}, \quad (195)$$

где b — ширина порога водослива;

H — статический напор;

v_0 — скорость подхода жидкости к гребню водослива;

a_0 — коэффициент Кориолиса;

m — коэффициент расхода жидкости через водослив.

Коэффициент расхода жидкости m , зависящий от целого ряда факторов (типа водослива, формы стенки, водосливного отверстия, сливной струи и т. п.), определяется опытным путём.

По Павловскому, коэффициент расхода m выражается следующим равенством:

$$m = m_0 \cdot \sigma_f \cdot \sigma_H \cdot \sigma_n \cdot \sigma_\varepsilon,$$

где m_0 — приведённый коэффициент расхода при $\sigma_f \cdot \sigma_H \cdot \sigma_n \cdot \sigma_\varepsilon = 1$;

σ_f — коэффициент, зависящий от формы гребня;

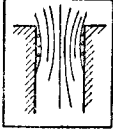
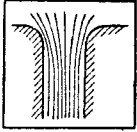
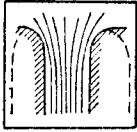
σ_H — коэффициент, зависящий от величины напора H ;

σ_n — коэффициент, зависящий от характера сопряжения струи с нижним бьефом (коэффициент затопления);

$\sigma_\varepsilon = 1 - \frac{\varepsilon}{b} \left(H + \frac{a_0 v_0^2}{2g} \right)$ — коэффициент, зависящий от сжатия струи (табл. 47).

Таблица 47

Значения коэффициента ε для определения σ_z

| $\varepsilon=0,2$ | $\varepsilon=0,14$ | $\varepsilon=0,08$ |
|---|---|---|
|  |  |  |

Таким образом, окончательно формула расхода принимает вид:

$$Q = m_2 \sqrt{2g} \cdot \sigma_f \cdot \sigma_n \cdot \sigma_z \cdot b \left(H + \frac{a_0 v_0^2}{2g} \right)^{3/2} \quad (196)$$

Расчётные данные для определения коэффициента расхода m наиболее часто встречающихся типов водосливов приведены в табл. 48—50.

В табл. 50 H_{np} — проектный напор плотин и $H_0 = H + \frac{a_0 v_0^2}{2g}$.

Таблица 48

Расчётные формулы для коэффициента расхода водосливов с тонкой стенкой

| Тип водослива | № фигуры | Формула коэффициента расхода m |
|---|----------------|---|
| <p>Незатопленный прямоугольный водослив с вертикальной стенкой и с горизонтальным сжатием.</p> <p>$b \leq 2 \text{ м}$</p> <p>$H \leq 0,05 \text{ до } 0,6 \text{ м}$</p> <p>$H_{p1} \leq 1,13 \text{ м}$</p> <p>(высота гребня водослива над дном верхнего бьефа)</p> | 55 61 63 | <p>При малых значениях $\frac{b}{B}$</p> $m = \left(0,405 + \frac{0,0027}{H} - \frac{0,033}{1 + \frac{b}{B}} \right) \times$ $\times \left[1 + 0,55 \frac{b^2}{B^2} \left(\frac{H}{H + H_{p1}} \right)^2 \right]$ <p>или при больших значениях $\frac{b}{B}$</p> $m = \left[0,405 + \frac{0,0027}{H} - 0,03 \left(\frac{B-b}{B} \right) \right] \times$ $\times \left[1 + 0,55 \frac{b^2}{B^2} \left(\frac{H}{H + H_{p1}} \right)^2 \right]$ |
| <p>Незатопленный прямоугольный водослив с вертикальной тонкой стенкой без горизонтального сжатия</p> <p>$H_{p1} \leq 1,13 \text{ м}$</p> <p>$b = B < 2 \text{ м}$</p> <p>$H \leq 1,24 \text{ м}$</p> | 55 64 | $m = \left(0,405 + \frac{0,0027}{H} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{H}{H + H_{p1}} \right)^2 \right]$ |
| <p>Затопленный прямоугольный водослив с вертикальной тонкой стенкой без горизонтального сжатия</p> | 61 64 70 | $m_0 = 1,05 \text{ м } \sigma_n = 1,05 \text{ м } \left(1 + 0,2 \frac{h_p}{H_{p1}} \right) \sqrt{\frac{z}{H}}$ |
| <p>Незатопленный прямоугольный водослив с наклонной тонкой стенкой без горизонтального сжатия</p> | 56 64 | <p>где</p> $m_0 = K m,$ <p>$K = 0,925$ при $\alpha = 45^\circ$ $K = 0,958$ при $\alpha = 71,5^\circ$ $K = 1,045$ при $\alpha = 108,5^\circ$ $K = 1,115$ при $\alpha = 135^\circ$</p> |
| <p>Незатопленный треугольный водослив с тонкой стенкой с углом $2\alpha = 90^\circ$</p> <p>Расчётные формулы даны применительно к уравнению</p> | 56 62 | <p>По опытам Томсона:</p> $Q = 1,4 H^{2,5}, \text{ где } H = 0,05 \div 0,25 \text{ м}$ <p>По опытам Барра в среднем:</p> $Q = 1,39 H^{2,5}, \text{ где } H = 0,075 \div 0,25 \text{ м}$ <p>По опытам Кинга:</p> $Q = 1,343 H^{2,47}, \text{ где } H = 0,05 \div 0,55 \text{ м}$ |

Т а б л и ц а 49

Расчётные данные для определения коэффициента расхода водосливов некоторых практических профилей

| Наименование коэффициента | Незатопленный водослив практического профиля | | | Затопленный водослив практического профиля | | |
|---------------------------------------|--|---|--|--|--|---------------|
| | прямоугольный | прямоугольный с закруглённым входным ребром | криволинейный высокий профиль | прямоугольный | прямоугольный с закруглённым входным ребром | криволинейный |
| | | | | | | |
| Приведённый коэффициент расхода m_z | 0,42 | 0,42 | 0,49 | 0,42 | 0,42 | 0,49 |
| Коэффициент формы σ_f | 1 | $1 + \frac{r}{H_0}$ | 1 | 1 | $1 + \frac{r}{H_0}$ | 1 |
| Коэффициент полноты напора σ_n | $0,7 + 0,185 \frac{H_0}{\delta}$ | $0,7 + 0,185 \frac{H_0}{\delta}$ | $0,785 + 0,25 \frac{H_0}{H_{np}}$ для $\frac{H_0}{H_{np}} = 0,1 + 0,3$; $0,88 + 0,12 \sqrt{\frac{H_0}{H_{np}}}$ для $\frac{H_0}{H_{np}} > 0,8$ | $0,7 + 0,185 \frac{H_0}{\delta}$ | $0,785 + 0,25 \frac{H_0}{H_{np}}$ для $\frac{H_0}{H_{np}} = 0,1 + 0,3$; $0,88 + 0,12 \sqrt{\frac{H_0}{H_{np}}}$ для $\frac{H_0}{H_{np}} > 0,8$ | |
| Коэффициент затопления σ_n | 1 | 1 | 1 | $\frac{h_p}{H_0}$ | 0 0,45 0,6 0,7 0,8 0,9 1 | |
| Коэффициент сжатия σ_n | | | | σ_n | 1 0,951 0,92 0,87 0,78 0,62 0 | |
| Коэффициент сжатия σ_s | $1 - \frac{\Sigma \xi}{b_1} \left(H + \frac{a_0 v_0^2}{2g} \right)$ | | | $1 - \frac{\Sigma \xi}{b} \left(H + \frac{a_0 v_0^2}{2g} \right)$ | | |

Т а б л и ц а 50

Расчётные данные для определения коэффициента расхода водосливов с широким порогом

| Наименование коэффициента | Незатопленный водослив с широким порогом | | Затопленный водослив с широким порогом | |
|---------------------------------------|--|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| | порог без закруглённого входного ребра | порог с закруглением входного ребра | порог без закруглённого входного ребра | порог с закруглением входного ребра |
| | | | | |
| Приведённый коэффициент расхода m_z | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 |
| Коэффициент формы σ_f | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Коэффициент полноты напора σ_n | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Коэффициент затопления σ_n | 1 | 1 | $\frac{a_e}{H_0}$ | $\frac{a_e}{H_0}$ |
| Коэффициент сжатия σ_s | $1 - \frac{\Sigma \xi}{b} \left(H + \frac{a_0 v_0^2}{2g} \right)$ | | $1 - \frac{\Sigma \xi}{b} \left(H + \frac{a_0 v_0^2}{2g} \right)$ | |

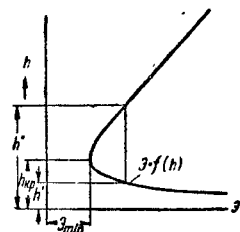
СОПРЯЖЕНИЕ СТРУИ С НИЖНИМ БЬЕФОМ

Удельная энергия потока выражается трёхчленом уравнения Бернулли (94).

Если за плоскость сравнения принять плоскость, проходящую через наинизшую точку живого сечения водослива, то величина

$$h + \frac{av^2}{2g} = h + \frac{aQ^2}{2g\omega^2} = \mathcal{E} \quad (197)$$

называется удельной энергией сечения.



Фиг. 73

Один и тот же расход, протекая с различной скоростью через сечение данной формы (в зависимости от гидравлических условий), будет создавать различную глубину потока. При этом будет меняться как общая величина удельной энергии сечения, так и соотношение между потенциальной \mathcal{E}_n и кинетической \mathcal{E}_k энергиями:

$$\mathcal{E} = h + \frac{aQ^2}{2g\omega^2} = \mathcal{E}_n + \mathcal{E}_k. \quad (198)$$

На фиг. 73 дан график зависимости $\mathcal{E} = f(h)$. Глубина, соответствующая минимальной величине удельной энергии сечения, называется критической глубиной $h_{кр}$.

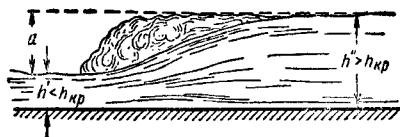
Глубина потока h , при которой $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{min}$, определяется из уравнения

$$\frac{d\mathcal{E}}{dh} = 1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g\omega^3} = 0, \quad (199)$$

где $B = \frac{d\omega}{dh}$ — ширина потока.

При $h > h_{кр}$ поток называется спокойным, при $h < h_{кр}$ — бурным, при $h = h_{кр}$ — критическое состояние потока.

Явление, характеризующееся внезапным резким увеличением глубины потока, с рез-



Фиг. 74

ким переходом от больших скоростей течения к меньшим, называется гидравлическим прыжком.

В зависимости от условий, в которых происходит прыжок, он может принимать различный вид. На фиг. 74, 75 и 75а показаны

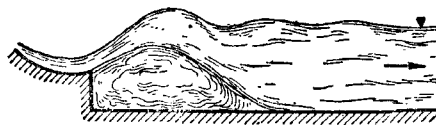


Фиг. 75

совершенный прыжок, прыжок-волна и поверхностный прыжок. Глубины в сечениях

до прыжка и за прыжком h' и h'' называются сопряженными глубинами (фиг. 74). Разность $h'' - h' = a$ есть высота прыжка. Сопряженные глубины связаны равенством так называемых прыжковых функций:

$$\frac{a_0 Q^2}{g\omega_1} + h'_{y.m}\omega_1 = \frac{a_0 Q^2}{g\omega_2} + h''_{y.m}\omega_2, \quad (200)$$



Фиг. 75а

где $h'_{y.m}$ и $h''_{y.m}$ — глубины погружения центров тяжести рассматриваемых сечений.

ВИДЫ СОПРЯЖЕНИЙ СТРУИ С НИЖНИМ БЬЕФОМ

Профиль водослива сопрягается с дном нижнего бьефа плавной кривой. Наименьшее сечение переливающейся струи будет у флютбета (сжатое сечение). Глубина h_c в этом сечении всегда меньше критической. Характер сопряжения струи определяется состоянием потока в нижнем бьефе — величиной его бытовой глубины h_0 :

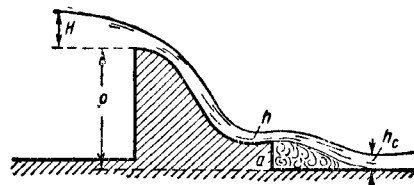
1) $h_0 < h_{кр}$ — сопряжение произойдет в виде плавной кривой подпора;
2) $h_0 > h_{кр}$ — возникает гидравлический прыжок.

В зависимости от соотношения между глубинами прыжок будет возникать при:

- $h_0 = h_c$ — в сжатом сечении;
- $h_0 < h_c$ — за сжатым сечением, где глубина $h_0 = h_c$ — так называемый отогнанный прыжок;
- $h_0 > h_c$ — прыжок «упрётся» в плотину — нависнутый прыжок.

Если при этом $h_0 > H_{p_2}$, то водослив будет затопленным.

Профиль водослива сопрягается с дном нижнего бьефа вертикальным уступом (фиг. 76). Если состояние потока в нижнем



Фиг. 76

бьефе спокойное, сопряжение произойдет в виде гидравлического прыжка:

- при $h_0 = h_c$ — совершенный прыжок,
- при $h_0 > h_c$ — свободный или затопленный поверхностный прыжок.

Состояние перехода от совершенного прыжка к свободному поверхностному назы-

вается первым критическим режимом прыжка. Состояние перехода от свободного поверхностного прыжка к затопленному называется вторым критическим режимом прыжка. Возникновение сопряжения в форме отогнанного прыжка весьма нежелательно, так как гашение прыжка вызывает размыв русла нижнего бьефа. Ввиду неустойчивости критического сопряжения при изменении расхода (прыжок начинается непосредственно в сжатом сечении) всегда стараются получить надвинутый прыжок, который даёт наиболее благоприятный поверхностный режим потока (максимальные скорости у поверхности).

ЗАТОПЛЕННЫЕ ВОДОСЛИВЫ

Водослив называется затопленным, если гребень его погружен под уровень нижнего бьефа. Расположение гребня ниже уровня нижнего бьефа—необходимое, но недостаточное условие затопления водослива, ибо в случае отогнанного прыжка водослив всё же не будет затоплен.

Условиями затопления для водосливов различных профилей будут:

а) водослив с широким порогом (фиг. 59 и 60)

$$(h_e - H_{p_2}) > \frac{2}{3} \left(H + \frac{a_0 v_0^2}{2g} \right); \quad (201)$$

б) водослив практического профиля (фиг. 71)

$$\frac{Z}{H_{p_2}} < \left(\frac{Z}{H_{p_2}} \right)_0, \quad (202)$$

где $\left(\frac{Z}{H_{p_2}} \right)_0$ зависит от профиля водослива (табл. 51);

Т а б л и ц а 51

Значения $\left(\frac{Z}{H_{p_2}} \right)_0$ в зависимости от $\frac{H + \frac{a_0 v_0^2}{2g}}{H_{p_2}}$ для водослива практического профиля

| $\frac{H + \frac{a_0 v_0^2}{2g}}{H_{p_2}}$ | 0 | 0,2 | 0,90 | 1,5 | 2 | 3 |
|--|---|------|------|-----|------|------|
| $\left(\frac{Z}{H_{p_2}} \right)_0$ | 1 | 0,84 | 0,76 | 0,8 | 0,86 | 1,05 |

в) водослив с тонкой стенкой (фиг. 70)

$$\frac{Z}{H_{p_2}} < \left(\frac{Z}{H_{p_2}} \right)_0, \quad (203)$$

где $\left(\frac{Z}{H_{p_2}} \right)_0$ по Бахметеву, берётся из табл. 52.

Т а б л и ц а 52

Значение $\left(\frac{Z}{H_{p_2}} \right)_0$ в зависимости от $\frac{H + \frac{a_0 v_0^2}{2g}}{H_{p_2}}$ для водослива с тонкой стенкой

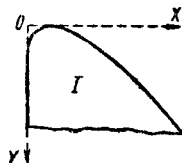
| $\frac{H + \frac{a_0 v_0^2}{2g}}{H_{p_2}}$ | 0 | 0,2 | 0,5 | 1,25 | 2 | 3 |
|--|---|-------|-------|-------|------|------|
| $\left(\frac{Z}{H_{p_2}} \right)_0$ | 1 | 0,825 | 0,725 | 0,675 | 0,71 | 0,85 |

БЕЗВАКУУМНЫЕ ВОДОСЛИВЫ

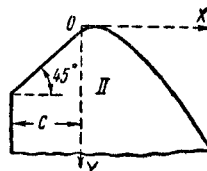
В практике гидротехнических сооружений из всех практических профилей водосливов наибольшее распространение получили криволинейные профили. Криволинейные профили подразделяются на две группы—вакуумные и безвакуумные.

Если между поверхностью профиля водослива и переливающейся через него струей будет свободное пространство, то в этом пространстве образуется вакуум. Такой профиль водослива называется вакуумным. Наличие вакуума делает струю неустойчивой и вызывает вибрацию и разрушение плотин. Вследствие этого обычно предпочитают безвакуумный профиль—профиль, совпадающий с нижним очертанием свободной струи. Безвакуумный профиль делает минимальным сжатие струи и обеспечивает наибольшую пропускную способность.

В основу построения безвакуумных профилей положено уравнение движения центра тяжести струи как свободно падающего тела с заданной начальной скоростью на гребне, которое даёт координаты нижней и верхней поверхностей струи и координаты криволи-



Фиг. 77



Фиг. 78

нейкого профиля, несколько врезающегося в нижнюю поверхность струи для более надёжного примыкания последней. В табл. 53 даны координаты профиля и струи для двух типов плотин (фиг. 77 и 78).

Для плавного сопряжения нижней части профиля с дном нижнего бьефа предложено выполнять переход по дуге круга, радиус которого берётся в зависимости от напора жидкости H и высоты стенки водослива P (табл. 54).

Таблица 53

Координаты для построения профиля водослива

| X | Форма I | | | Форма II | | |
|-----|---------------------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| | У | | | У | | |
| | очертания кладки | очертания струи | | очертания кладки | очертания струи | |
| | | внешней поверх- ности | внутрен- ней по- верхнос- ти | | внешней поверх- ности | внутрен- ней по- верхнос- ти |
| 0,0 | 0,125 | -0,831 | 0,126 | 0,043 | -0,781 | 0,043 |
| 0,1 | 0,036 | -0,803 | 0,036 | 0,010 | -0,756 | 0,010 |
| 0,2 | 0,007 | -0,772 | 0,007 | 0,000 | -0,724 | 0,000 |
| 0,3 | 0,000 | -0,740 | 0,000 | 0,005 | -0,689 | 0,005 |
| 0,4 | 0,007 | -0,702 | 0,007 | 0,023 | -0,648 | 0,023 |
| 0,6 | 0,063 | -0,620 | 0,063 | 0,090 | -0,552 | 0,090 |
| 0,8 | 0,142 | -0,511 | 0,153 | 0,189 | -0,435 | 0,193 |
| 1,0 | 0,257 | -0,380 | 0,267 | 0,321 | -0,293 | 0,333 |
| 1,2 | 0,397 | -0,219 | 0,410 | 0,480 | -0,120 | 0,500 |
| 1,4 | 0,565 | -0,030 | 0,590 | 0,665 | -0,075 | 0,700 |
| 1,7 | 0,870 | 0,305 | 0,920 | 0,992 | 0,438 | 1,05 |
| 2,0 | 1,22 | 0,633 | 1,31 | 1,377 | 0,860 | 1,47 |
| 2,5 | 1,96 | 1,50 | 2,10 | 2,14 | 1,71 | 2,34 |
| 3,0 | 2,82 | 2,50 | 3,11 | 3,06 | 2,76 | 3,39 |
| 3,5 | 3,82 | 3,66 | 4,26 | 4,08 | 4,00 | 4,61 |
| 4,0 | 4,93 | 5,00 | 5,61 | 5,24 | 5,42 | 6,04 |
| 4,5 | 6,22 | 6,54 | 7,15 | 6,58 | 7,07 | 7,61 |

Примечание. Координаты даны для «полного» напора $H_0=1$ (в любых мерах); при других величинах напора следует все числа таблицы умножить на H_0 .

Таблица 54

 Значение сопрягающих радиусов r для плотин (размеры в м)

| H \ P | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 10 | 3,0 | 4,2 | 5,4 | 6,5 | 7,5 | 8,5 | 9,6 | 10,6 | 11,6 |
| 20 | 4,0 | 6,0 | 7,8 | 9,9 | 10,0 | 11,0 | 12,2 | 13,3 | 14,3 |
| 30 | 4,5 | 7,5 | 9,7 | 11,0 | 12,4 | 13,5 | 14,7 | 15,8 | 16,8 |
| 40 | 4,7 | 8,4 | 11,0 | 13,0 | 14,5 | 15,8 | 17,0 | 18,0 | 19,0 |
| 50 | 4,8 | 8,8 | 12,2 | 14,5 | 16,5 | 18,0 | 19,2 | 20,3 | 21,3 |
| 60 | 4,9 | 8,9 | 13,0 | 15,5 | 18,0 | 20,0 | 21,2 | 22,2 | 23,2 |

РАСЧЁТ ОТВЕРСТИЙ МАЛЫХ МОСТОВ И БЕЗНАПОРНЫХ ТРУБ

Отверстия малых мостов и безнапорных труб обычно служат для пропуска весенних и сливных вод через насыпи железных, шоссежных и грунтовых дорог. Напор перед этими отверстиями создаётся стеснением поперечного сечения потока устоями и быками. Расчёт отверстий малых мостов и безнапорных труб является частным случаем водослива с широким порогом, в котором подпор создаётся без возвышения порога водослива над дном водотока. При расчёте следует различать случаи затопленного и незатопленного водослива.

Для незатопленного водослива ширина b отверстия малого моста или безнапорной трубы определяется по формуле

$$b = \frac{gQ}{\mu v^3}, \quad (204)$$

где μ — коэффициент расхода.

По Павловскому, $\mu = \varepsilon$ (коэффициент сжатия) и выбирается по табл. 69.

Для затопленного водослива с широким порогом

$$b = \frac{Q}{\varepsilon h v}. \quad (205)$$

После определения ширины производят проверочный расчёт на величину создаваемого подпора Z .

При незатопленном водосливе

$$Z = \left(\frac{1}{K} - 1 \right) h_n - \frac{a_0 v_0^2}{2g}, \quad (206)$$

где v_0 — скорость подхода;
 h_n — глубина на пороге;

$$K = \frac{2\varphi^2}{2\varphi^3 + 1};$$

φ — коэффициент скорости, величину которого Павловский рекомендует брать равной 0,95.

При затопленном водосливе

$$Z = \frac{v^2}{\varphi^2 2g} - \frac{a v_0^2}{2g}; \quad (\varphi = 0,95). \quad (207)$$

НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ

При неравномерном движении глубина потока h , а следовательно, и поверхностный уклон I зависят от длины пути потока s , т. е. $h = f(s)$. Свободная поверхность потока принимает форму «кривой подпора», если с изменением s происходит увеличение h , и «кривой спада», если h уменьшается.

Для призматического, медленно изменяющегося русла (канала) любого очертания общее дифференциальное уравнение неравномерного движения имеет вид:

$$\frac{dz}{ds} = \frac{d}{ds} \left(\frac{v^2}{2g} \right) + \frac{dh}{ds}$$

где $\frac{dz}{ds}$ — изменение положения уровня потока по длине русла — пьезометрический уклон I ;

$\frac{d}{ds} \left(\frac{v^2}{2g} \right)$ — изменение скоростного напора («скоростной уклон»);

$\frac{dh}{ds}$ — потеря напора на гидравлические сопротивления; гидравлический уклон — i .

Если неравномерный поток рассматривать состоящим из бесконечно большого числа элементарных участков длиной ds с равномерным движением, то, по Шези,

$$\frac{dh}{ds} = i = \frac{v^2}{c^2 R}.$$

Если уклон дна русла i_0 на всём протяжении рассматриваемого участка потока одинаков, то

$$\frac{dz}{ds} = i_0 - \frac{dh}{ds}.$$

При этих условиях основное уравнение упрощается:

$$i_0 - \frac{dh}{ds} = \frac{d}{ds} \left(\frac{v^3}{2g} \right) + \frac{v^3}{C^2 R}.$$

При постоянстве расхода $Q = \text{const}$ и площади поперечного сечения потока ω :

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{v^3}{2g} \right) = - \frac{v^3}{g \omega^3} \left(\frac{\partial \omega}{\partial s} + \frac{\partial \omega}{\partial h} \cdot \frac{dh}{ds} \right).$$

Так как для призматических русел

$$\frac{\partial \omega}{\partial s} = 0; \quad \frac{\partial \omega}{\partial h} = \frac{d\omega}{dh} = B \quad (\text{фиг. 79}),$$

то

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i_0 - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}}{1 - \frac{Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3}}.$$

Если расход на участках равномерного и неравномерного движения одинаков, то в случае широкого неглубокого русла

$\omega = B \cdot h$, $R \approx h$, а $Q = B h_0 v_0 = C_0 B h_0 \sqrt{h_0 i}$ (v_0 , h_0 и C_0 — нормальные скорость, глубина и коэффициент Шези на участке равномерно-го движения). Тогда при $C \approx C_0$



Фиг. 79

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i_0 [h^3 - h_0^3]}{h^3 - \frac{C_0^2 \cdot i_0}{g} \cdot h_0^3}.$$

Для широкого неглубокого русла параболического очертания

$$\omega = \frac{2}{3} B h, \quad R \approx \frac{2}{3} h, \quad \omega \approx B R,$$

и следовательно

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i_0 (h^4 - h_0^4)}{h^4 - \frac{C_0^2 i_0}{g} h_0^4}.$$

При допущении по Бахметеву приемлемости показательного закона $(K_0 : K)^2 = (h_0 : h)^x$, где x — гидравлический показатель русла

$$\frac{dh}{ds} = i_0 \frac{h^x - h_0^x}{h^x - \frac{C_0^2 i_0}{g} \frac{B}{\chi} h_0^x}.$$

Критическая глубина. В тех случаях, когда знаменатель уравнений обращается в нуль, $\frac{dh}{ds} = \infty$, т. е. происходит разрыв непрерывности функции $h = f(s)$.

Глубина, при которой происходит разрыв функции $h = f(s)$, называется критической глубиной — h_k . Выше (199) было указано, что критическая глубина, определяемая заданным расходом Q и формой русла, характеризуется наименьшей удельной энергией сечения. Значения критических глубин для русел различных очертаний указаны в табл. 55.

Таблица 55

Значение критических глубин h_k для различных очертаний русел

| Очертания русла | h_k | Примечание |
|--------------------------------|---|---|
| Прямоугольное | $\frac{\alpha v^3}{g}$ | α — коэффициент Кориолиса; |
| Параболическое | $\frac{3}{2} \cdot \frac{\alpha v^3}{g}$ | $m = \text{ctg}^2 \beta$ — коэффициент откоса |
| Полукруглое . . | $\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\alpha v^3}{g}$ | $u_k = \frac{b_k}{h_k}$ |
| Треугольное . . | $2 \frac{\alpha v^3}{g}$ | (см. фиг. 47) |
| Трапециoidalное (симметричное) | $\left(1 + \frac{m}{u_k + m} \right) \frac{\alpha v^3}{g}$ | |

Критический уклон. Критическим уклоном h_k называется уклон дна канала, при котором для заданного расхода Q нормальная глубина h_0 равна критической глубине h_k , т. е.

$$i_k = \frac{g}{\alpha \cdot C^2}.$$

Так как $i_k = f(C^2)$, то критический уклон зависит от шероховатости русла, возрастающей с её увеличением. В табл. 56 приведены значения критического уклона в зависимости от гидравлического радиуса и шероховатости русла.

Таблица 56

Зависимость критического уклона от величины гидравлического радиуса и шероховатости русла

| Коэффициент шероховатости русла χ по Базену | Величина критического уклона при гидравлическом радиусе в м | | | | | | | |
|--|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| 0,06 | 0,0017 | 0,0015 | 0,0014 | 0,0013 | 0,0013 | 0,0012 | 0,0012 | 0,0012 |
| 0,16 | 0,0026 | 0,0022 | 0,0018 | 0,0016 | 0,0014 | 0,0013 | 0,0013 | 0,0013 |
| 0,46 | 0,0070 | 0,0048 | 0,0032 | 0,0024 | 0,0020 | 0,0017 | 0,0015 | 0,0014 |
| 0,85 | — | 0,0098 | 0,0057 | 0,0038 | 0,0029 | 0,0022 | 0,0019 | 0,0017 |
| 1,30 | — | — | 0,0094 | 0,0059 | 0,0041 | 0,0029 | 0,0023 | 0,0019 |
| 1,75 | — | — | — | 0,0083 | 0,0056 | 0,0037 | 0,0028 | 0,0023 |

Основное уравнение неравномерного движения, выраженное через h_k , имеет вид:

$$\frac{dh}{ds} = i_0 \frac{h^x - h_0^x}{h^x - h_k^x}.$$

КРИВЫЕ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

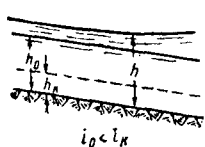
В зависимости от расположения нормальной h_0 и критической линии глубин могут иметь место три рода кривых свободной поверхности в открытом русле, причём разные величины глубин потока могут создавать различные случаи неравномерного движения:

I. Нормальная глубина больше критической ($h_0 > h_K$):

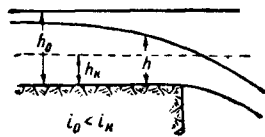
$$a) h > h_0 \text{ или } h > h_K; \frac{dh}{ds} > 0.$$

Глубины растут по течению (кривая подпора) — фиг. 80.

$$b) h < h_0, \text{ но } h > h_K; \frac{dh}{ds} < 0.$$



Фиг. 80

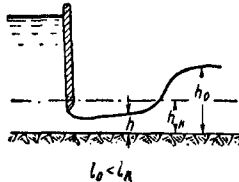


Фиг. 81

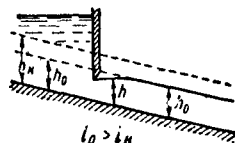
Глубины уменьшаются по течению (кривая спада) — фиг. 81.

$$c) h < h_0; h < h_K; \frac{dh}{ds} > 0.$$

Глубины возрастают по течению и могут достичь линии критических глубин; здесь следует ожидать образования прыжка — фиг. 82.



Фиг. 82



Фиг. 83

II. Нормальная глубина меньше критической ($h_0 < h_K$):

$$a) h < h_0 \text{ или } h < h_K; \frac{dh}{ds} > 0.$$

Глубины возрастают в направлении течения — фиг. 83.

$$b) h > h_0, \text{ но } h < h_K; \frac{dh}{ds} < 0.$$

Глубины убывают по течению — фиг. 84.

$$c) h > h_0 \text{ и } h > h_K; \frac{dh}{ds} > 0.$$

Глубины возрастают по течению, но так как нормальная глубина ниже порога, а порог выше критической глубины, — образуется гидравлический прыжок — фиг. 85.

III. Нормальная глубина равна критической ($h_0 = h_K$), в этом случае имеем

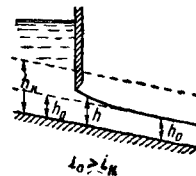
$$\frac{dh}{ds} = i_0,$$

откуда следует, что линия поверхности жидкости имеет постоянный уклон, т. е. это прямая линия. Эта прямая наклонена к линии, параллельной дну потока, под тем же углом, под которым дно наклонено к горизонту, т. е. линия поверхности жидкости горизонтальна — фиг. 86 и 87.

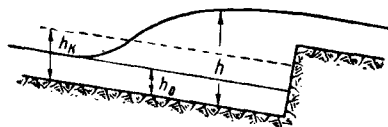
Таким образом, каналы критического уклона сопрягаются с уровнем нижнего бьефа без прыжка.

В каналах (руслах) с горизонтальным дном или с обратным уклоном дна равномерное движение невозможно.

В таких каналах возможны только два вида кривых свободной поверхности потока: 1) кривая спада — фиг. 81 и 2) кривая подпора для малых глубин, не превышающих критической h_K , — фиг. 82.



Фиг. 84



Фиг. 85

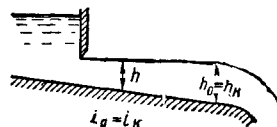
Построение кривых спада и подпора. Построение кривых спада и подпора, т. е. установление зависимости между глубиной h и расстоянием s от некоторой исходной точки для широкого, неглубокого русла,



Фиг. 86

приближающегося к прямоугольному, производится по формуле:

$$\frac{i_0}{h_0} (s_2 - s_1) = (\eta_2 - \eta_1) - \left(1 - \frac{C_0^2 i_0}{g}\right) [\psi(\eta_2) - \psi(\eta_1)],$$



Фиг. 87

где $\eta = \frac{h}{h_0}$; индексы 1 и 2 относятся к сечениям, находящимся на расстояниях s_1 и s_2 от исходного пункта.

Значения функций $\psi(\eta)$ приведены в табл. 57. $\eta < 1$ соответствует кривым спада, $\eta > 1$ — кривым подпора. Кривые свободной поверхности удобнее строить, задаваясь глубинами h , т. е. η , и отыскивать соответствующие им значения $s_2 - s_1$.

Значения $\psi(\eta)$

Таблица 57

| η | $\psi(\eta)$ | η | $\psi(\eta)$ | η | $\psi(\eta)$ | η | $\psi(\eta)$ | η | $\psi(\eta)$ |
|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|---------|--------------|
| 0,00 | -0,6046 | 0,860 | 0,4872 | 0,976 | 1,1160 | 1,0204 | 1,1848 | 1,1086 | 0,6556 |
| 0,01 | -0,5946 | 0,870 | 0,5156 | 0,977 | 1,1305 | 1,0215 | 1,1686 | 1,1111 | 0,6489 |
| 0,15 | -0,4545 | 0,880 | 0,5459 | 0,978 | 1,1457 | 1,0225 | 1,1531 | 1,1173 | 0,6327 |
| 0,20 | -0,4012 | 0,890 | 0,5785 | 0,979 | 1,1615 | 1,0235 | 1,1383 | 1,1236 | 0,6173 |
| 0,25 | -0,3536 | 0,900 | 0,6138 | 0,980 | 1,1781 | 1,0246 | 1,1241 | 1,1299 | 0,6025 |
| 0,30 | -0,3025 | 0,902 | 0,6213 | 0,981 | 1,1955 | 1,0256 | 1,1105 | 1,1364 | 0,5884 |
| 0,35 | -0,2508 | 0,904 | 0,6289 | 0,982 | 1,2139 | 1,0267 | 1,0974 | 1,1429 | 0,5749 |
| 0,40 | -0,1980 | 0,906 | 0,6366 | 0,983 | 1,2333 | 1,0277 | 1,0848 | 1,1494 | 0,5619 |
| 0,45 | -0,1438 | 0,908 | 0,6445 | 0,984 | 1,2538 | 1,0288 | 1,0727 | 1,1561 | 0,5494 |
| 0,50 | -0,0878 | 0,910 | 0,6525 | 0,985 | 1,2757 | 1,0299 | 1,0610 | 1,1628 | 0,5374 |
| 0,51 | -0,0763 | 0,912 | 0,6607 | 0,986 | 1,2990 | 1,0309 | 1,0497 | 1,1696 | 0,5258 |
| 0,52 | -0,0647 | 0,914 | 0,6691 | 0,987 | 1,3241 | 1,0331 | 1,0282 | 1,1765 | 0,5146 |
| 0,53 | -0,0530 | 0,916 | 0,6776 | 0,988 | 1,3511 | 1,0352 | 1,0080 | 1,1905 | 0,4932 |
| 0,54 | -0,0412 | 0,918 | 0,6864 | 0,989 | 1,3804 | 1,0373 | 0,9890 | 1,2048 | 0,4733 |
| 0,55 | -0,0293 | 0,920 | 0,6953 | 0,990 | 1,4125 | 1,0395 | 0,9709 | 1,2195 | 0,4544 |
| 0,56 | -0,0172 | 0,922 | 0,7045 | 0,991 | 1,4480 | 1,0417 | 0,9539 | 1,2346 | 0,4367 |
| 0,57 | -0,0050 | 0,924 | 0,7138 | 0,992 | 1,4876 | 1,0438 | 0,9376 | 1,2500 | 0,4198 |
| 0,58 | 0,0074 | 0,926 | 0,7234 | 0,993 | 1,5324 | 1,0460 | 0,9221 | 1,2658 | 0,4039 |
| 0,59 | 0,0199 | 0,928 | 0,7332 | 0,994 | 1,5841 | 1,0482 | 0,9073 | 1,2821 | 0,3886 |
| 0,60 | 0,0325 | 0,930 | 0,7433 | 0,995 | 1,6452 | 1,0504 | 0,8931 | 1,2987 | 0,3741 |
| 0,61 | 0,0454 | 0,932 | 0,7537 | 0,996 | 1,7200 | 1,0526 | 0,8795 | 1,3158 | 0,3603 |
| 0,62 | 0,0584 | 0,934 | 0,7643 | 0,997 | 1,8162 | 1,0549 | 0,8665 | 1,3333 | 0,3470 |
| 0,63 | 0,0716 | 0,936 | 0,7753 | 0,998 | 1,9517 | 1,0571 | 0,8539 | 1,3514 | 0,3343 |
| 0,64 | 0,0851 | 0,938 | 0,7866 | 0,999 | 2,1831 | 1,0593 | 0,8418 | 1,3699 | 0,3221 |
| 0,65 | 0,0987 | 0,940 | 0,7982 | 1,000 | ∞ | 1,0616 | 0,8301 | 1,3889 | 0,3104 |
| 0,66 | 0,1127 | 0,942 | 0,8102 | 1,0000 | ∞ | 1,0638 | 0,8188 | 1,4085 | 0,2991 |
| 0,67 | 0,1268 | 0,944 | 0,8226 | 1,0010 | 2,1834 | 1,0661 | 0,8079 | 1,4286 | 0,2883 |
| 0,68 | 0,1413 | 0,946 | 0,8354 | 1,0020 | 1,9523 | 1,0684 | 0,7973 | 1,4706 | 0,2677 |
| 0,69 | 0,1560 | 0,948 | 0,8487 | 1,0030 | 1,8172 | 1,0707 | 0,7871 | 1,5152 | 0,2486 |
| 0,70 | 0,1711 | 0,950 | 0,8624 | 1,0040 | 1,7213 | 1,0730 | 0,7772 | 1,5625 | 0,2306 |
| 0,71 | 0,1864 | 0,952 | 0,8767 | 1,0050 | 1,6469 | 1,0753 | 0,7675 | 1,6129 | 0,2138 |
| 0,72 | 0,2022 | 0,954 | 0,8916 | 1,0060 | 1,5861 | 1,0776 | 0,7581 | 1,6667 | 0,1980 |
| 0,73 | 0,2184 | 0,956 | 0,9071 | 1,0070 | 1,5348 | 1,0799 | 0,7490 | 1,8182 | 0,1625 |
| 0,74 | 0,2350 | 0,958 | 0,9233 | 1,0081 | 1,4902 | 1,0823 | 0,7401 | 1,9231 | 0,1435 |
| 0,75 | 0,2520 | 0,960 | 0,9402 | 1,0091 | 1,4510 | 1,0846 | 0,7315 | 1,9608 | 0,1376 |
| 0,76 | 0,2696 | 0,962 | 0,9580 | 1,0101 | 1,4159 | 1,0870 | 0,7231 | 2,0000 | 0,1318 |
| 0,77 | 0,2877 | 0,964 | 0,9767 | 1,0111 | 1,3841 | 1,0893 | 0,7149 | 2,222 | 0,1052 |
| 0,78 | 0,3064 | 0,966 | 0,9965 | 1,0121 | 1,3551 | 1,0917 | 0,7069 | 2,5000 | 0,0821 |
| 0,79 | 0,3258 | 0,968 | 1,0174 | 1,0132 | 1,3284 | 1,0941 | 0,6990 | 2,8571 | 0,0623 |
| 0,80 | 0,3459 | 0,970 | 1,0396 | 1,0142 | 1,3037 | 1,0965 | 0,6914 | 3,3333 | 0,0455 |
| 0,81 | 0,3668 | 0,971 | 1,0512 | 1,0152 | 1,2807 | 1,0939 | 0,6839 | 4,0000 | 0,0314 |
| 0,82 | 0,3886 | 0,972 | 1,0632 | 1,0163 | 1,2592 | 1,1013 | 0,6766 | 5,0000 | 0,0201 |
| 0,83 | 0,4114 | 0,973 | 1,0757 | 1,0173 | 1,2390 | 1,1038 | 0,6695 | 6,6667 | 0,0113 |
| 0,84 | 0,4353 | 0,974 | 1,0886 | 1,0183 | 1,2199 | 1,1062 | 0,6625 | 10,0000 | 0,0059 |
| 0,85 | 0,4605 | 0,975 | 1,1020 | 1,0194 | 1,2019 | | | | |

Построение кривых свободной поверхности потоков в широких неглубоких руслах, приближающихся к параболическому очертанию, производится по формулам Толкмитта.

Кривые подпора ($\eta > 1$):

$$\frac{i_0}{h_0} (s_2 - s_1) = F(\eta_2) - F(\eta_1).$$

Значения функций $F(\eta)$ приведены в табл. 58.

Кривые спада ($\eta < 1$):

$$\frac{i_0}{h_0} (s_2 - s_1) = (\eta_2 - \eta_1) - \left(1 - \frac{C_0^2 \cdot i_0}{g}\right) [F(\eta_2) - F(\eta_1)].$$

Значения функции $F(\eta)$ приведены в табл. 59.

Значения $F(\eta)$ для кривых подпора

| η | $F(\eta)$ | η | $F(\eta)$ | η | $F(\eta)$ | η | $F(\eta)$ |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| 1,00 | $-\infty$ | 1,16 | 0,865 | 1,37 | 1,221 | 1,90 | 1,850 |
| 1,005 | -0,102 | 1,17 | 0,887 | 1,38 | 1,235 | 1,95 | 1,904 |
| 1,01 | 0,074 | 1,18 | 0,908 | 1,39 | 1,249 | 2,00 | 1,957 |
| 1,015 | 0,179 | 1,19 | 0,928 | 1,40 | 1,262 | 2,1 | 2,053 |
| 1,02 | 0,254 | 1,20 | 0,948 | 1,41 | 1,276 | 2,2 | 2,163 |
| 1,025 | 0,313 | 1,21 | 0,967 | 1,42 | 1,289 | 2,3 | 2,272 |
| 1,03 | 0,362 | 1,22 | 0,985 | 1,43 | 1,302 | 2,4 | 2,376 |
| 1,035 | 0,403 | 1,23 | 1,003 | 1,44 | 1,315 | 2,5 | 2,478 |
| 1,04 | 0,440 | 1,24 | 1,021 | 1,45 | 1,328 | 2,6 | 2,584 |
| 1,045 | 0,473 | 1,25 | 1,038 | 1,46 | 1,341 | 2,7 | 2,693 |
| 1,05 | 0,502 | 1,26 | 1,055 | 1,47 | 1,354 | 2,8 | 2,785 |
| 1,06 | 0,554 | 1,27 | 1,071 | 1,48 | 1,367 | 2,9 | 2,886 |
| 1,07 | 0,599 | 1,28 | 1,087 | 1,49 | 1,379 | 3,0 | 2,988 |
| 1,08 | 0,635 | 1,29 | 1,103 | 1,50 | 1,392 | 3,5 | 3,492 |
| 1,09 | 0,675 | 1,30 | 1,119 | 1,55 | 1,453 | 4,0 | 3,995 |
| 1,10 | 0,708 | 1,31 | 1,134 | 1,60 | 1,513 | 4,5 | 4,496 |
| 1,11 | 0,738 | 1,32 | 1,149 | 1,65 | 1,571 | 5,0 | 4,997 |
| 1,12 | 0,766 | 1,33 | 1,164 | 1,70 | 1,628 | 6,0 | 5,998 |
| 1,13 | 0,793 | 1,34 | 1,178 | 1,75 | 1,685 | 8,0 | 7,999 |
| 1,14 | 0,818 | 1,35 | 1,193 | 1,80 | 1,740 | 10,0 | 10,000 |
| 1,15 | 0,842 | 1,36 | 1,207 | 1,85 | 1,795 | | |

Таблица 59

 Значения $F(\eta)$ для кривых спада

| η | $F(\eta)$ | η | $F(\eta)$ | η | $F(\eta)$ | η | $F(\eta)$ |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| 1,000 | ∞ | 0,925 | 1,185 | 0,80 | 0,887 | 0,65 | 0,676 |
| 0,995 | 1,889 | 0,920 | 1,166 | 0,79 | 0,870 | 0,64 | 0,664 |
| 0,990 | 1,714 | 0,915 | 1,149 | 0,78 | 0,854 | 0,63 | 0,652 |
| 0,985 | 1,610 | 0,910 | 1,133 | 0,77 | 0,838 | 0,62 | 0,640 |
| 0,980 | 1,536 | 0,905 | 1,117 | 0,76 | 0,823 | 0,61 | 0,628 |
| 0,975 | 1,479 | 0,90 | 1,103 | 0,75 | 0,808 | 0,60 | 0,617 |
| 0,970 | 1,431 | 0,89 | 1,075 | 0,74 | 0,794 | 0,55 | 0,561 |
| 0,965 | 1,391 | 0,88 | 1,049 | 0,73 | 0,780 | 0,50 | 0,506 |
| 0,960 | 1,355 | 0,87 | 1,025 | 0,72 | 0,766 | 0,45 | 0,454 |
| 0,955 | 1,324 | 0,86 | 1,002 | 0,71 | 0,732 | 0,40 | 0,402 |
| 0,950 | 1,296 | 0,85 | 0,980 | 0,70 | 0,739 | 0,35 | 0,351 |
| 0,945 | 1,270 | 0,84 | 0,960 | 0,69 | 0,726 | 0,30 | 0,300 |
| 0,940 | 1,246 | 0,83 | 0,940 | 0,68 | 0,713 | 0,20 | 0,200 |
| 0,935 | 1,224 | 0,82 | 0,922 | 0,67 | 0,701 | 0,10 | 0,100 |
| 0,930 | 1,204 | 0,81 | 0,904 | 0,66 | 0,688 | 0 | 0 |

Кривые свободной поверхности потоков в искусственных призматических руслах небольшой ширины и относительно большой глубины, по очертанию отличающихся от прямоугольного и параболического, строятся по формуле Бахметева:

$$\frac{i_0}{h_0} (s_2 - s_1) = (\eta_2 - \eta_1) - (1 - j) [B(\eta_2) - B(\eta_1)],$$

где j — безразмерный параметр, введенный Павловским,

$$j = \frac{\alpha C^2 i_0}{g} \cdot \frac{B}{x};$$

x — смоченный периметр канала (русла).

Значения функции $B(\eta)$ приведены в табл. 60 и 61.

Таблица 60

 Значения $B(\eta)$ по Бахметеву
 Канал с прямым уклоном $i_0 > 0$ при $\alpha = 3,5$

| η | $B(\eta)$ | η | $B(\eta)$ | η | $B(\eta)$ | η | $B(\eta)$ |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| 0 | 0 | 0,77 | 0,866 | 0,980 | 1,642 | 1,20 | 0,341 |
| 0,05 | 0,050 | 0,78 | 0,877 | 0,985 | 1,726 | 1,21 | 0,330 |
| 0,10 | 0,100 | 0,79 | 0,895 | 0,990 | 1,844 | 1,22 | 0,320 |
| 0,15 | 0,150 | 0,80 | 0,913 | 0,995 | 2,043 | 1,23 | 0,310 |
| 0,20 | 0,200 | 0,81 | 0,931 | 1,000 | ∞ | 1,24 | 0,301 |
| 0,25 | 0,250 | 0,82 | 0,952 | 1,005 | 1,329 | 1,25 | 0,292 |
| 0,30 | 0,301 | 0,83 | 0,972 | 1,010 | 1,138 | 1,26 | 0,284 |
| 0,35 | 0,352 | 0,84 | 0,993 | 1,015 | 1,022 | 1,27 | 0,276 |
| 0,40 | 0,404 | 0,85 | 1,016 | 1,020 | 0,940 | 1,28 | 0,269 |
| 0,45 | 0,456 | 0,86 | 1,039 | 1,025 | 0,879 | 1,29 | 0,262 |
| 0,50 | 0,510 | 0,87 | 1,064 | 1,030 | 0,827 | 1,30 | 0,255 |
| 0,55 | 0,566 | 0,88 | 1,091 | 1,035 | 0,785 | 1,31 | 0,248 |
| 0,60 | 0,625 | 0,89 | 1,120 | 1,040 | 0,748 | 1,32 | 0,242 |
| 0,61 | 0,637 | 0,90 | 1,151 | 1,045 | 0,716 | 1,33 | 0,236 |
| 0,62 | 0,649 | 0,905 | 1,168 | 1,05 | 0,688 | 1,34 | 0,230 |
| 0,63 | 0,661 | 0,910 | 1,185 | 1,06 | 0,636 | 1,35 | 0,22 |
| 0,64 | 0,674 | 0,915 | 1,204 | 1,07 | 0,595 | 1,36 | 0,219 |
| 0,65 | 0,687 | 0,920 | 1,223 | 1,08 | 0,564 | 1,37 | 0,214 |
| 0,66 | 0,700 | 0,925 | 1,243 | 1,09 | 0,534 | 1,38 | 0,209 |
| 0,67 | 0,713 | 0,930 | 1,263 | 1,10 | 0,507 | 1,39 | 0,205 |
| 0,68 | 0,726 | 0,935 | 1,288 | 1,11 | 0,483 | 1,40 | 0,200 |
| 0,69 | 0,740 | 0,940 | 1,313 | 1,12 | 0,461 | 1,41 | 0,196 |
| 0,70 | 0,754 | 0,945 | 1,339 | 1,13 | 0,442 | 1,42 | 0,192 |
| 0,71 | 0,768 | 0,950 | 1,368 | 1,14 | 0,424 | 1,43 | 0,188 |
| 0,72 | 0,782 | 0,955 | 1,400 | 1,15 | 0,407 | 1,44 | 0,184 |
| 0,73 | 0,797 | 0,960 | 1,436 | 1,16 | 0,391 | 1,45 | 0,180 |
| 0,74 | 0,812 | 0,965 | 1,476 | 1,17 | 0,377 | 1,46 | 0,176 |
| 0,75 | 0,828 | 0,970 | 1,522 | 1,18 | 0,364 | 1,47 | 0,173 |
| 0,76 | 0,844 | 0,975 | 1,576 | 1,19 | 0,352 | 1,48 | 0,169 |

Таблица 61

 Значения $B(\eta)$ по Бахметеву
 Канал с прямым уклоном $i_0 > 0$ $\alpha = 4,0$

| η | $B(\eta)$ | η | $B(\eta)$ | η | $B(\eta)$ | η | $B(\eta)$ |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| 0 | 0 | 0,77 | 0,838 | 0,980 | 1,537 | 1,20 | 0,252 |
| 0,05 | 0,050 | 0,78 | 0,854 | 0,985 | 1,611 | 1,21 | 0,243 |
| 0,10 | 0,100 | 0,79 | 0,870 | 0,990 | 1,714 | 1,22 | 0,235 |
| 0,15 | 0,150 | 0,80 | 0,887 | 0,995 | 1,889 | 1,23 | 0,227 |
| 0,20 | 0,200 | 0,81 | 0,904 | 1,000 | ∞ | 1,24 | 0,219 |
| 0,25 | 0,250 | 0,82 | 0,922 | 1,005 | 1,107 | 1,25 | 0,212 |
| 0,30 | 0,300 | 0,83 | 0,940 | 1,010 | 0,930 | 1,26 | 0,205 |
| 0,35 | 0,351 | 0,84 | 0,960 | 1,015 | 0,836 | 1,27 | 0,199 |
| 0,40 | 0,402 | 0,85 | 0,980 | 1,020 | 0,766 | 1,28 | 0,193 |
| 0,45 | 0,454 | 0,86 | 1,002 | 1,025 | 0,712 | 1,29 | 0,187 |
| 0,50 | 0,507 | 0,87 | 1,025 | 1,030 | 0,668 | 1,30 | 0,182 |
| 0,55 | 0,561 | 0,88 | 1,049 | 1,035 | 0,632 | 1,31 | 0,176 |
| 0,60 | 0,617 | 0,89 | 1,075 | 1,040 | 0,606 | 1,32 | 0,171 |
| 0,61 | 0,628 | 0,90 | 1,103 | 1,045 | 0,572 | 1,33 | 0,167 |
| 0,62 | 0,640 | 0,905 | 1,118 | 1,05 | 0,548 | 1,34 | 0,162 |
| 0,63 | 0,652 | 0,910 | 1,134 | 1,06 | 0,506 | 1,35 | 0,157 |
| 0,64 | 0,664 | 0,915 | 1,150 | 1,07 | 0,471 | 1,36 | 0,153 |
| 0,65 | 0,678 | 0,920 | 1,167 | 1,08 | 0,441 | 1,37 | 0,149 |
| 0,66 | 0,688 | 0,925 | 1,185 | 1,09 | 0,415 | 1,38 | 0,145 |
| 0,67 | 0,700 | 0,930 | 1,204 | 1,10 | 0,392 | 1,39 | 0,142 |
| 0,68 | 0,713 | 0,935 | 1,225 | 1,11 | 0,372 | 1,40 | 0,138 |
| 0,69 | 0,726 | 0,940 | 1,247 | 1,12 | 0,354 | 1,41 | 0,135 |
| 0,70 | 0,739 | 0,945 | 1,271 | 1,13 | 0,337 | 1,42 | 0,131 |
| 0,71 | 0,752 | 0,950 | 1,297 | 1,14 | 0,322 | 1,43 | 0,128 |
| 0,72 | 0,766 | 0,955 | 1,325 | 1,15 | 0,308 | 1,44 | 0,125 |
| 0,73 | 0,780 | 0,960 | 1,356 | 1,16 | 0,295 | 1,45 | 0,122 |
| 0,74 | 0,794 | 0,965 | 1,391 | 1,17 | 0,283 | 1,46 | 0,119 |
| 0,75 | 0,808 | 0,970 | 1,431 | 1,18 | 0,272 | 1,47 | 0,116 |
| 0,76 | 0,823 | 0,975 | 1,479 | 1,19 | 0,262 | 1,48 | 0,113 |

Порядок построения кривых подпора и спада по Бахметеву следующий: вычисляются h_0 и h_K ; в зависимости от их соотношения устанавливается тип кривой свободной поверхности (I, II, III); вычисляются: гидравлический показатель русла x (179),

коэффициент Шези $C = \frac{C_1 + C_2}{2}$, ширина русла по верху $B = \frac{B_1 + B_2}{2}$ и смоченный пери-

метр $x = \frac{x_1 + x_2}{2}$; индексы 1 и 2 соответствуют сечениям с заданной или вычисленной глубинами h_1 и h_2 ; задавшись произвольными величинами h , определяют по уравнению Бахметева, положения живых сечений s_1 и s_2 с заданными глубинами, после чего строят кривые подпора и спада.

Уравнение Павловского:

$$\frac{i_0 (s_2 - s_1)}{ah_0} = (x_2 - x_1) - (1 - j) [P(x_2) - P(x_1)],$$

где

$$a = \frac{1}{h_0} \cdot \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1};$$

$\alpha = \frac{k}{k_0}$ — относительный модуль расхода; остальные обозначения прежние.

Значения функции $P(x)$ приведены в табл. 62.

Таблица 62

Значения $\Pi(x)$ по Павловскому

| x | $\Pi(x)$ | x | $\Pi(x)$ | x | $\Pi(x)$ | x | $\Pi(x)$ | x | $\Pi(x)$ |
|------|----------|-------|----------|-------|----------|------|----------|------|----------|
| 0,00 | 0 | 0,77 | 1,020 | 0,980 | 2,297 | 1,20 | 1,199 | 1,49 | 0,813 |
| 0,05 | 0,051 | 0,78 | 1,045 | 0,985 | 2,442 | 1,21 | 1,177 | 1,50 | 0,805 |
| 0,10 | 0,100 | 0,79 | 1,071 | 0,990 | 3,046 | 1,22 | 1,156 | 1,55 | 0,767 |
| 0,15 | 0,151 | 0,80 | 1,098 | 0,995 | 3,000 | 1,23 | 1,136 | 1,60 | 0,733 |
| 0,20 | 0,203 | 0,81 | 1,127 | 1,000 | ∞ | 1,24 | 1,117 | 1,65 | 0,703 |
| 0,25 | 0,255 | 0,82 | 1,156 | 1,005 | 2,997 | 1,25 | 1,098 | 1,70 | 0,675 |
| 0,30 | 0,309 | 0,83 | 1,188 | 1,010 | 2,652 | 1,26 | 1,081 | 1,75 | 0,650 |
| 0,35 | 0,365 | 0,84 | 1,221 | 1,015 | 2,450 | 1,27 | 1,065 | 1,80 | 0,626 |
| 0,40 | 0,424 | 0,85 | 1,256 | 1,020 | 2,307 | 1,28 | 1,049 | 1,85 | 0,605 |
| 0,45 | 0,485 | 0,86 | 1,293 | 1,025 | 2,197 | 1,29 | 1,033 | 1,90 | 0,585 |
| 0,50 | 0,549 | 0,87 | 1,333 | 1,030 | 2,107 | 1,30 | 1,018 | 1,95 | 0,566 |
| 0,55 | 0,619 | 0,88 | 1,375 | 1,035 | 2,031 | 1,31 | 1,004 | 2,0 | 0,549 |
| 0,60 | 0,693 | 0,89 | 1,421 | 1,040 | 1,966 | 1,32 | 0,990 | 2,1 | 0,518 |
| 0,61 | 0,709 | 0,90 | 1,472 | 1,045 | 1,908 | 1,33 | 0,977 | 2,2 | 0,490 |
| 0,62 | 0,725 | 0,905 | 1,499 | 1,05 | 1,857 | 1,34 | 0,964 | 2,3 | 0,466 |
| 0,63 | 0,741 | 0,910 | 1,527 | 1,06 | 1,768 | 1,35 | 0,952 | 2,4 | 0,444 |
| 0,64 | 0,758 | 0,915 | 1,557 | 1,07 | 1,693 | 1,36 | 0,940 | 2,5 | 0,424 |
| 0,65 | 0,775 | 0,920 | 1,589 | 1,08 | 1,629 | 1,37 | 0,928 | 2,6 | 0,405 |
| 0,66 | 0,792 | 0,925 | 1,622 | 1,09 | 1,573 | 1,38 | 0,917 | 2,7 | 0,389 |
| 0,67 | 0,810 | 0,930 | 1,658 | 1,10 | 1,522 | 1,39 | 0,906 | 2,8 | 0,374 |
| 0,68 | 0,829 | 0,935 | 1,696 | 1,11 | 1,477 | 1,40 | 0,896 | 2,9 | 0,360 |
| 0,69 | 0,848 | 0,940 | 1,738 | 1,12 | 1,436 | 1,41 | 0,886 | 3,0 | 0,346 |
| 0,70 | 0,867 | 0,945 | 1,782 | 1,13 | 1,398 | 1,42 | 0,876 | 3,5 | 0,294 |
| 0,71 | 0,887 | 0,950 | 1,831 | 1,14 | 1,363 | 1,43 | 0,866 | 4,0 | 0,255 |
| 0,72 | 0,907 | 0,955 | 1,885 | 1,15 | 1,321 | 1,44 | 0,856 | 4,5 | 0,226 |
| 0,73 | 0,928 | 0,960 | 1,945 | 1,16 | 1,301 | 1,45 | 0,847 | 5,0 | 0,203 |
| 0,74 | 0,950 | 0,965 | 2,013 | 1,17 | 1,273 | 1,46 | 0,838 | 6,0 | 0,168 |
| 0,75 | 0,972 | 0,970 | 2,092 | 1,18 | 1,247 | 1,47 | 0,829 | 8,0 | 0,126 |
| 0,76 | 0,996 | 0,975 | 2,184 | 1,19 | 1,222 | 1,48 | 0,821 | 10,0 | 0,100 |

Преимущество метода Павловского состоит в возможности строить кривые свободной поверхности для призматических русел любой правильной формы, пользуясь только одной таблицей, в то время как, по Бахметеву, необходимо подыскивать нужную из ряда таблиц.

Кривые свободной поверхности потоков в горизонтальных руслах строятся при помощи формулы:

$$\frac{i_k}{h_k} (s_2 - s_1) = \psi_0(\xi_1) - \psi_0(\xi_2),$$

где h_k — критическая глубина;

h — глубина потока;

i_k — критический уклон;

$$\xi = \frac{h}{h_k}.$$

Значения функции $\psi_0(\xi)$ для гидравлического показателя русла $x = 3,5$ приведены в табл. 63.

Построение кривых свободной поверхности потоков в непризматических руслах производится по приближенному методу среднего уклона трения — фиг. 88.

$$(i_0 - i_f) l = \left(\frac{v_c^2}{2g} + h_c \right) - \left(\frac{v_s^2}{2g} + h_s \right) = \mathcal{E}_c - \mathcal{E}_s.$$

Таблица 63

Значения $\psi_0(\xi)$ по Павловскому
(Для горизонтального русла $i_0 = 0$ при $x = 3,5$)

| ξ | $\psi_0(\xi)$ | ξ | $\psi_0(\xi)$ | ξ | $\psi_0(\xi)$ | ξ | $\psi_0(\xi)$ | ξ | $\psi_0(\xi)$ |
|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|
| 0 | 0 | 0,78 | -0,7074 | 0,990 | -0,7716 | 1,22 | -0,6762 | 1,55 | 0,047 |
| 0,05 | -0,0500 | 0,79 | -0,7131 | 0,995 | -0,7777 | 1,23 | -0,6659 | 1,60 | 0,243 |
| 0,10 | -0,1000 | 0,80 | -0,7186 | 1,000 | -0,7778 | 1,24 | -0,6550 | 1,65 | 0,466 |
| 0,15 | -0,1500 | 0,81 | -0,7239 | 1,005 | -0,7777 | 1,25 | -0,6434 | 1,70 | 0,720 |
| 0,20 | -0,1998 | 0,82 | -0,7290 | 1,010 | -0,7776 | 1,26 | -0,6313 | 1,75 | 1,007 |
| 0,25 | -0,2496 | 0,83 | -0,7339 | 1,015 | -0,7774 | 1,27 | -0,6185 | 1,80 | 1,330 |
| 0,30 | -0,2990 | 0,84 | -0,7386 | 1,020 | -0,7771 | 1,28 | -0,6051 | 1,85 | 1,690 |
| 0,35 | -0,3480 | 0,85 | -0,7430 | 1,025 | -0,7767 | 1,29 | -0,5911 | 1,90 | 2,092 |
| 0,40 | -0,3964 | 0,86 | -0,7472 | 1,030 | -0,7762 | 1,30 | -0,5764 | 1,95 | 2,537 |
| 0,45 | -0,4439 | 0,87 | -0,7512 | 1,035 | -0,7756 | 1,31 | -0,5610 | 2,0 | 3,028 |
| 0,50 | -0,4902 | 0,88 | -0,7550 | 1,040 | -0,7749 | 1,32 | -0,5449 | 2,1 | 4,163 |
| 0,55 | -0,5349 | 0,89 | -0,7585 | 1,045 | -0,7741 | 1,33 | -0,5281 | 2,2 | 5,521 |
| 0,60 | -0,5777 | 0,90 | -0,7617 | 1,05 | -0,7732 | 1,34 | -0,5106 | 2,3 | 7,131 |
| 0,61 | -0,5860 | 0,905 | -0,7632 | 1,06 | -0,7711 | 1,35 | -0,4924 | 2,4 | 9,02 |
| 0,62 | -0,5941 | 0,910 | -0,7646 | 1,07 | -0,7687 | 1,36 | -0,4734 | 2,5 | 11,23 |
| 0,63 | -0,6022 | 0,915 | -0,7660 | 1,08 | -0,7658 | 1,37 | -0,4537 | 2,6 | 13,77 |
| 0,64 | -0,6102 | 0,920 | -0,7673 | 1,09 | -0,7625 | 1,38 | -0,4332 | 2,7 | 16,70 |
| 0,65 | -0,6180 | 0,925 | -0,7685 | 1,10 | -0,7588 | 1,39 | -0,4120 | 2,8 | 20,06 |
| 0,66 | -0,6257 | 0,930 | -0,7697 | 1,11 | -0,7546 | 1,40 | -0,390 | 2,9 | 23,87 |
| 0,67 | -0,6333 | 0,935 | -0,7708 | 1,12 | -0,7499 | 1,41 | -0,367 | 3,0 | 28,18 |
| 0,68 | -0,6408 | 0,940 | -0,7718 | 1,13 | -0,7448 | 1,42 | -0,343 | 3,5 | 58,89 |
| 0,69 | -0,6482 | 0,945 | -0,7727 | 1,14 | -0,7393 | 1,43 | -0,319 | 4,0 | 109,8 |
| 0,70 | -0,6554 | 0,950 | -0,7736 | 1,15 | -0,7332 | 1,44 | -0,293 | 4,5 | 188,8 |
| 0,71 | -0,6624 | 0,955 | -0,7745 | 1,16 | -0,7266 | 1,45 | -0,267 | 5,0 | 305,6 |
| 0,72 | -0,6693 | 0,960 | -0,7751 | 1,17 | -0,7196 | 1,46 | -0,240 | 6,0 | 699,4 |
| 0,73 | -0,6761 | 0,965 | -0,7757 | 1,18 | -0,7120 | 1,47 | -0,212 | 7,0 | 1405 |
| 0,74 | -0,6827 | 0,970 | -0,7762 | 1,19 | -0,7039 | 1,48 | -0,183 | 8,0 | 2566 |
| 0,75 | -0,6891 | 0,975 | -0,7767 | 1,20 | -0,6952 | 1,49 | -0,153 | 9,0 | 4365 |
| 0,76 | -0,6954 | 0,980 | -0,7771 | 1,21 | -0,6860 | 1,50 | -0,122 | 10,0 | 7017 |
| 0,77 | -0,7015 | 0,985 | -0,7774 | | | | | | |

где i_0 — уклон дна канала (русла);
 v_a и v_c — скорости в сечениях потока, рас-
 положенных на расстоянии l
 друг от друга;
 h_a и h_c — глубины потоков в тех же сече-
 ниях;
 i_f — средний уклон трения;

$$i_f \approx \frac{v^2}{C^2 R},$$

причём

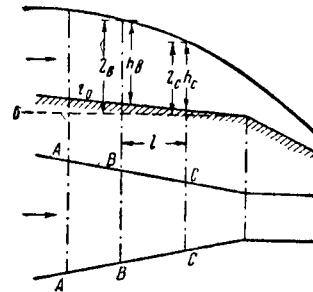
$$v = \frac{v_a + v_c}{2}; \quad C = \frac{C_a + C_c}{2} \quad \text{и} \quad R = \frac{R_a + R_c}{2};$$

\mathcal{E}_a и \mathcal{E}_c — удельные энергии в сечениях
 В и С.

Процесс построения кривых свободной
 поверхности потоков сводится к нахождению
 l при известных h_a , h_c и вычисленных ве-
 личинах i_f , \mathcal{E}_c и \mathcal{E}_a .

К естественным речным руслам приведён-
 ные выше методы построения кривых сво-

бодной поверхности потоков необходимо
 применять весьма осторожно, так как они
 не являются призматическими, уклон дна и



Фиг. 88

расход их непостоянны, а шероховатость
 русла различна не только на разных участ-
 ках, но и в разных местах одного и того

Значение $f\left(\frac{z}{h_0}\right)$
 (для кривых подпора)

Таблица 64

| $\sim \frac{z}{h_0}$ | $f\left(\frac{z}{h_0}\right)$ | $\sim \frac{z}{h_0}$ | $f\left(\frac{z}{h_0}\right)$ | $\sim \frac{z}{h_0}$ | $f\left(\frac{z}{h_0}\right)$ | $\sim \frac{z}{h_0}$ | $f\left(\frac{z}{h_0}\right)$ | $\sim \frac{z}{h_0}$ | $f\left(\frac{z}{h_0}\right)$ |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| 0,010 | 0,0067 | 0,235 | 1,2148 | 0,460 | 1,6032 | 0,635 | 1,9077 | 0,905 | 2,1742 |
| 0,015 | 0,01452 | 0,240 | 1,2254 | 0,465 | 1,6106 | 0,690 | 1,9140 | 0,910 | 2,1800 |
| 0,020 | 0,0244 | 0,245 | 1,2358 | 0,470 | 1,6179 | 0,695 | 1,9203 | 0,915 | 2,1858 |
| 0,025 | 0,03222 | 0,250 | 1,2461 | 0,475 | 1,6252 | 0,700 | 1,9266 | 0,920 | 2,1916 |
| 0,030 | 0,03863 | 0,255 | 1,2563 | 0,480 | 1,6324 | 0,705 | 1,9329 | 0,925 | 2,1974 |
| 0,035 | 0,04411 | 0,260 | 1,2664 | 0,485 | 1,6396 | 0,710 | 1,9392 | 0,930 | 2,2032 |
| 0,040 | 0,04889 | 0,265 | 1,2763 | 0,490 | 1,6463 | 0,715 | 1,9455 | 0,935 | 2,2090 |
| 0,045 | 0,05316 | 0,270 | 1,2861 | 0,495 | 1,6540 | 0,720 | 1,9517 | 0,940 | 2,2148 |
| 0,050 | 0,05701 | 0,275 | 1,2958 | 0,500 | 1,6611 | 0,725 | 1,9579 | 0,945 | 2,2206 |
| 0,055 | 0,06053 | 0,280 | 1,3054 | 0,505 | 1,6682 | 0,730 | 1,9641 | 0,950 | 2,2264 |
| 0,060 | 0,06376 | 0,285 | 1,3149 | 0,510 | 1,6753 | 0,735 | 1,9703 | 0,955 | 2,2322 |
| 0,065 | 0,06677 | 0,290 | 1,3243 | 0,515 | 1,6823 | 0,740 | 1,9765 | 0,960 | 2,2380 |
| 0,070 | 0,06958 | 0,295 | 1,3336 | 0,520 | 1,6893 | 0,745 | 1,9827 | 0,965 | 2,2438 |
| 0,075 | 0,07222 | 0,300 | 1,3428 | 0,525 | 1,6963 | 0,750 | 1,9888 | 0,970 | 2,2496 |
| 0,080 | 0,07482 | 0,305 | 1,3519 | 0,530 | 1,7032 | 0,755 | 1,9949 | 0,975 | 2,2554 |
| 0,085 | 0,07708 | 0,310 | 1,3610 | 0,535 | 1,7101 | 0,760 | 2,0010 | 0,980 | 2,2611 |
| 0,090 | 0,07933 | 0,315 | 1,3700 | 0,540 | 1,7170 | 0,765 | 2,0071 | 0,985 | 2,2668 |
| 0,095 | 0,08148 | 0,320 | 1,3789 | 0,545 | 1,7239 | 0,770 | 2,0132 | 0,990 | 2,2725 |
| 0,100 | 0,08353 | 0,325 | 1,3877 | 0,550 | 1,7308 | 0,775 | 2,0193 | 0,995 | 2,2782 |
| 0,105 | 0,08550 | 0,330 | 1,3964 | 0,555 | 1,7376 | 0,780 | 2,0254 | 1,000 | 2,2839 |
| 0,110 | 0,08739 | 0,335 | 1,4050 | 0,560 | 1,7444 | 0,785 | 2,0315 | 1,100 | 2,3971 |
| 0,115 | 0,08922 | 0,340 | 1,4136 | 0,565 | 1,7512 | 0,790 | 2,0375 | 1,200 | 2,5083 |
| 0,120 | 0,09098 | 0,345 | 1,4221 | 0,570 | 1,7579 | 0,795 | 2,0435 | 1,300 | 2,6179 |
| 0,125 | 0,09269 | 0,350 | 1,4306 | 0,575 | 1,7647 | 0,800 | 2,0495 | 1,400 | 2,7264 |
| 0,130 | 0,09434 | 0,355 | 1,4390 | 0,580 | 1,7714 | 0,805 | 2,0555 | 1,500 | 2,8337 |
| 0,135 | 0,09595 | 0,360 | 1,4473 | 0,585 | 1,7781 | 0,810 | 2,0615 | 1,600 | 2,9401 |
| 0,140 | 0,09751 | 0,365 | 1,4556 | 0,590 | 1,7848 | 0,815 | 2,0675 | 1,700 | 3,0458 |
| 0,145 | 0,09903 | 0,370 | 1,4638 | 0,595 | 1,7914 | 0,820 | 2,0735 | 1,800 | 3,1508 |
| 0,150 | 1,0051 | 0,375 | 1,4720 | 0,600 | 1,7980 | 0,825 | 2,0795 | 1,900 | 3,2553 |
| 0,155 | 1,0195 | 0,380 | 1,4801 | 0,605 | 1,8046 | 0,830 | 2,0855 | 2,000 | 3,3594 |
| 0,160 | 1,0335 | 0,385 | 1,4882 | 0,610 | 1,8112 | 0,835 | 2,0915 | 2,100 | 3,4631 |
| 0,165 | 1,0473 | 0,390 | 1,4962 | 0,615 | 1,8178 | 0,840 | 2,0975 | 2,200 | 3,5664 |
| 0,170 | 1,0608 | 0,395 | 1,5041 | 0,620 | 1,8243 | 0,845 | 2,1035 | 2,300 | 3,6694 |
| 0,175 | 1,0740 | 0,400 | 1,5119 | 0,625 | 1,8308 | 0,850 | 2,1095 | 2,400 | 3,7720 |
| 0,180 | 1,0869 | 0,405 | 1,5197 | 0,630 | 1,8373 | 0,855 | 2,1154 | 2,500 | 3,8745 |
| 0,185 | 1,0995 | 0,410 | 1,5275 | 0,635 | 1,8438 | 0,860 | 2,1213 | 2,600 | 3,9768 |
| 0,190 | 1,1119 | 0,415 | 1,5353 | 0,640 | 1,8503 | 0,865 | 2,1272 | 2,700 | 4,0789 |
| 0,195 | 1,1241 | 0,420 | 1,5430 | 0,645 | 1,8567 | 0,870 | 2,1331 | 2,800 | 4,1808 |
| 0,200 | 1,1361 | 0,425 | 1,5507 | 0,650 | 1,8631 | 0,875 | 2,1390 | 2,900 | 4,2826 |
| 0,205 | 1,1479 | 0,430 | 1,5583 | 0,655 | 1,8695 | 0,880 | 2,1449 | 3,000 | 4,3845 |
| 0,210 | 1,1595 | 0,435 | 1,5659 | 0,660 | 1,8759 | 0,885 | 2,1508 | 3,500 | 4,8911 |
| 0,215 | 1,1709 | 0,440 | 1,5734 | 0,665 | 1,8823 | 0,890 | 2,1567 | 4,000 | 5,3958 |
| 0,220 | 1,1821 | 0,445 | 1,5809 | 0,670 | 1,8887 | 0,895 | 2,1625 | 4,500 | 5,8993 |
| 0,225 | 1,1931 | 0,450 | 1,5884 | 0,675 | 1,8951 | 0,900 | 2,1683 | 5,000 | 6,4018 |
| 0,230 | 1,2040 | 0,455 | 1,5953 | 0,680 | 1,9014 | | | | |

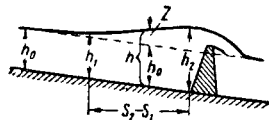
же сечения. В этих условиях (см. фиг. 89) расчёт часто ведётся по формуле

$$\frac{i_0}{h_0} (s_2 - s_1) = f\left(\frac{z_2}{h_0}\right) - f\left(\frac{z_1}{h_0}\right).$$

Значения функции $f\left(\frac{z}{h_0}\right)$ приведены в табл. 64.

Остальные обозначения прежние.

Этот метод особенно удобен при построении кривых подпора в широких неглубоких руслах со слабым уклоном (равнинные реки).



Фиг. 89

Из приведённых ранее формул наилучшие результаты даёт формула Бахметова.

При построении кривых спада и подпора необходимо избегать чрезмерно больших расстояний ($s_2 - s_1$) между рассматриваемыми сечениями, так как приближённый приведённых методов может привести к серьёзным ошибкам.

НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ ПРИ ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ

Этот случай был исследован Е. З. Рабиновичем, получившим основное уравнение неравномерного движения при ламинарном режиме (для призматических русел) в виде:

$$\frac{dh}{ds} = i_0 \cdot \frac{1 - \frac{\beta_0 \omega R_0}{\beta_0 \omega R}}{\omega^3 \cdot B - 1 - \frac{\omega^3 \cdot B_k}{\omega^3 \cdot B_k}},$$

где индексы «0» относятся к равномерному движению, а индексы «к» соответствуют критической глубине.

При выводе данного уравнения принят линейный закон гидравлических сопротивлений, характеризуемых коэффициентом β — так называемым коэффициентом «формы сечения», определяемым в каждом отдельном случае, в зависимости от формы поперечного сечения потока.

Интегрирование этого уравнения для случая призматического русла весьма большой ширины по сравнению с глубиной, когда влиянием боковых стенок можно пренебречь (случай, аналогичный рассмотренному Брессом для турбулентного режима), приводит к уравнению:

$$\frac{i_0}{h_0} (s_2 - s_1) = (\tau_2 - \tau_1) - \frac{1}{2} \ln \frac{\tau_2 + 1}{\tau_1 + 1} + \frac{\tau_2^2}{\tau_1^2 - 1} + \frac{1}{2} \theta h_0 \ln \frac{\tau_2^2 - 1}{\tau_1^2 - 1},$$

по которому может быть построена кривая подпора.

Здесь:

$$\tau_1 = \frac{h_1}{h_0}; \quad \tau_2 = \frac{h_2}{h_0}; \quad \theta = \frac{i_0^2 \alpha}{\beta_0^2 \cdot g},$$

где

$$\beta_0 = \frac{3\nu}{gh_0},$$

α — коэффициент Кориолиса = 1,54;

ν — кинематическая вязкость жидкости.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЫЖОК

Высота прыжка $h_2 - h_1$ в руслах прямоугольного очертания определяется разностью глубин потока в канале (русле) до прыжка h_1 и после прыжка h_2 , h_1 и h_2 связаны между собой уравнениями:

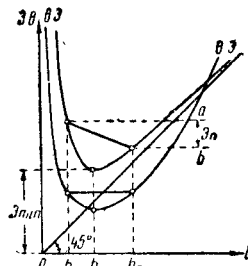
$$h_1 = \frac{h_k}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2h_k}{h_2}\right)^3} - 1 \right];$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2h_k}{h_1}\right)^3} - 1 \right],$$

где h_k — критическая глубина потока.

Таким образом, высота прыжка, тем больше, чем глубина потока до прыжка меньше критической глубины.

В руслах любого очертания определение высоты прыжка ($h_2 - h_1$) удобнее производить по графику прыжковой функции (200) фиг. 90. Для этого вычисляют значение прыжковой функции θ при разных глубинах русла. Так как значения прыжковой функции для сопряжённых глубин одинаковы, то, зная одну из глубин h_1 и, проводя горизонтальную прямую через точку с координатой h_1 до пересечения с другой ветвью кривой θ , находят h_2 . Из фиг. 90 следует, что минимумы удельной энергии сечения θ и прыжковой функции θ поступают при $h = h_k$.



Фиг. 90

Длина русла L , на протяжении которого происходит переход от первой взаимной глубины h_1 ко второй h_2 , называется длиной прыжка — фиг. 91. Длина прыжка определяет протяжение усиленного крепления русла, размеры водобойных колодцев, стенок и т. д.

Длина прыжка L в прямоугольных каналах, по Павловскому, равна

$$L = 2,5 [1,9 \xi_2 - \xi_1] h_k,$$

где

$$\xi_1 = \frac{h_1}{h_k}; \quad \xi_2 = \frac{h_2}{h_k}.$$

По Бахметеву, L зависит от $\lambda = \left(\frac{h_c}{h}\right)^3$.

На фиг. 92 приведена кривая зависимости $\frac{L}{h_2 - h_1}$ как от λ (верхняя строка), так и от $\frac{h_c}{h}$ (нижняя строка). В трапециoidal-

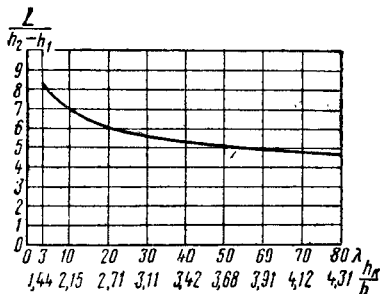


Фиг. 91

ных каналах длина прыжка меньше, чем в прямоугольных:

$$L = 5h_2 \left[1 + 4 \sqrt{\frac{B_2 - B_1}{B_2}} \right],$$

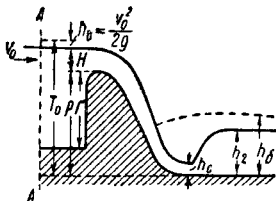
где B_1 и B_2 — ширина трапециoidalного русла по верху в сечениях до и после прыжка.



Фиг. 92

Потеря удельной энергии потока \mathcal{E} при образовании гидравлического прыжка равна:

$$\mathcal{E} = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 h_1 \cdot h_2}.$$



Фиг. 93

Глубина потока в сжатом сечении струи, ниспадающей с водослива, h_c — фиг. 93, определяется из энергетического уравнения сопряжения бьефов:

$$T_0 = h_c + \frac{Q^2}{2g \varphi^2 b^2 h_c^2},$$

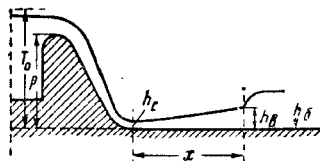
$$\text{где } T_0 = \frac{v_0^2}{2g} + H + p;$$

φ — коэффициент скорости; $\varphi \approx 0,95$ при истечении через водосливы практи-

ческих профилей с плавными криволинейными очертаниями; $\varphi \approx 0,90$ при истечении из-под шитов;

b — ширина водослива.

Определение длины отгона прыжка сводится к нахождению такой длины x , при которой толщина струи h_c возрастает до глубины h_g — фиг. 94, взаимной с бытовой

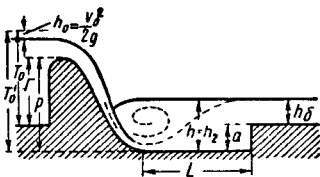


Фиг. 94

глубиной (уровень нижнего бьефа) h_g при высоте прыжка $h_2 - h_g$. В этом случае, зная h_g (считая $h_g = h_2$), находят глубину h_c (считая $h_g = h_1$); длину отгона прыжка x вычисляют по формулам, приведенным выше.

ВОДОБОЙНЫЕ КОЛОДЦЫ И СТЕНКИ

Чтобы предупредить размыв русла потоком, движущимся с большими скоростями на протяжении длины отгона прыжка, не

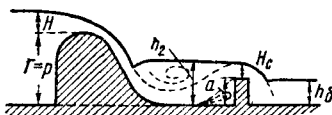


Фиг. 95

допускают его отгона, затопляя прыжок в водобойных колодцах (фиг. 95), или преграждая поток водобойной стенкой (фиг. 96).

Для вычисления глубины водобойного колодца a вычисляют h_c , определяют взаимную глубину h_2 , считая $h_1 = h_c$, откуда

$$a \geq h_2 - h_g.$$



Фиг. 96

При этом значении a прыжок будет затоплен.

Высота водобойной стенки a находится из условия

$$a + H_c \geq h_2,$$

где H_c — толщина слоя воды, переливающейся через водобойную стенку.

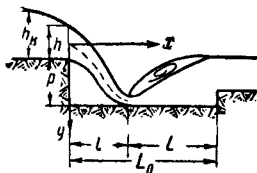
Длина колодца или расстояние до стенки L для предотвращения выхода части вальца из колодца или за водобойную стенку (фиг. 97) равна

$$L_0 \geq l + L,$$

где l — длина абсциссы струи, ниспадающей с водослива

$$l = v \cdot \sqrt{\frac{2p+h}{g}},$$

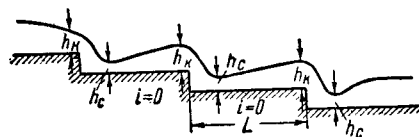
L — длина прыжка.



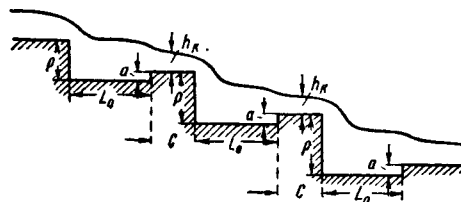
Фиг. 97

Длина ступеней перепадов (фиг. 98) назначается из условия, чтобы в пределах каждой ступени происходило максимальное гашение кинетической энергии потока, т. е. чтобы глубина потока вблизи конца каждой ступени была равна h_K .

Гидравлический расчёт перепадов колодезного типа (фиг. 99) заключается в рас-



Фиг. 98



Фиг. 99

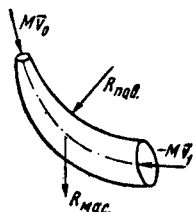
чёте высоты водобойных стенок и длин колодцев.

УДАР ЖИДКОСТИ

ТЕОРЕМА ЭЙЛЕРА

Основной теоремой, служащей для исследования действия жидкой струи на различные препятствия, является теорема Эйлера.

Производная по времени вектора \vec{Q} количества движения некоторой системы материальных точек равняется главному



Фиг. 100

вектору всех внешних сил, действующих на систему (фиг. 100):

$$\frac{d\vec{Q}}{dt} = M (\vec{v}_1 - \vec{v}_0) = \vec{R}_{масс} + \vec{R}_{нов}, \quad (208)$$

где $\vec{R}_{масс}$ — главный вектор внешних массовых сил;

$\vec{R}_{нов}$ — главный вектор внешних поверхностных сил;

M — масса жидкости, протекающей через живое сечение в единицу времени.

В том случае, когда имеет место удар жидкости о подвижную поверхность, уравнение (208) примет вид:

$$d \frac{(\vec{Q}_e + \vec{Q}_r)}{dt} = \vec{R}_{масс} + \vec{R}_{нов}, \quad (209)$$

где \vec{Q}_e — вектор количества движения струи в переносном движении;

\vec{Q}_r — вектор количества движения струи в относительном движении.

Имея в виду, что

$$\frac{d\vec{Q}_r}{dt} = M_{r1} \vec{v}_{r1} - M_{r0} \vec{v}_{r0} + \vec{\Omega}_e \times \vec{Q}_r, \quad (210)$$

где M_{r1} и M_{r0} — секундные массы жидкости в относительном движении;

\vec{v}_{r1} и \vec{v}_{r0} — относительные скорости жидкости;

$\vec{\Omega}_e \times \vec{Q}_r$ — векторное произведение вектора переносной угловой скорости $\vec{\Omega}_e$ и вектора количества движения струи в относительном движении \vec{Q}_r ;

уравнение (209) преобразуется в

$$M_{r0} \vec{v}_{r0} - M_{r1} \vec{v}_{r1} + \vec{R}_{масс} + \vec{R}_{нов} = \frac{d\vec{Q}_e}{dt} + \vec{\Omega}_e \times \vec{Q}_r, \quad (211)$$

В частном случае, когда переносное движение поступательное и равномерное, т. е. $\vec{\Omega}_e = 0$ и $\frac{d\vec{Q}_e}{dt} = 0$, уравнение (211) будет выглядеть так:

$$M_{r0} \vec{v}_{r0} - M_{r1} \vec{v}_{r1} + \vec{R}_{масс} + \vec{R}_{нов} = 0. \quad (212)$$

Теорема Эйлера позволяет определить силу реакции плоскости R_T , равную, по принципу «действие равно противодействию», силе, с которой жидкость действует на плоскость.

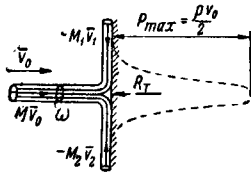
Ниже для ряда частных случаев приведены формулы, определяющие силу реакции

поверхности R_T ; для упрощения предполагается, что трение отсутствует и жидкость невесома.

УДАР ЖИДКОСТИ О НЕПОДВИЖНУЮ ПЛОСКОСТЬ

а) Плоскость перпендикулярна оси струи (фиг. 101):

$$R_T = \rho \omega v_0^2. \quad (213)$$



Фиг. 101

Действительная величина $R_T = \varphi \rho \omega v_0^2$, где, по Вейсбаху, $\varphi = 0,92 \div 0,96$; ρ — плотность жидкости; ω — поперечное сечение струи.

б) Плоскость образует с осью струи угол α (фиг. 102):

$$R_T = M v_0 \sin \alpha = \rho \omega v_0^2 \sin \alpha.$$

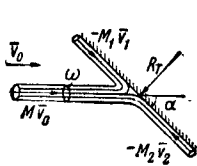
УДАР ЖИДКОСТИ О НЕПОДВИЖНУЮ КРИВОЛИНЕЙНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

а) Поверхность имеет ось симметрии, совпадающую с осью струи (фиг. 103):

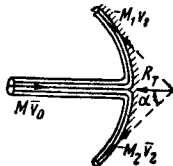
$$R_T = M v_0 (1 + \cos \alpha) = \rho \omega v_0^2 (1 + \cos \alpha); \quad (214)$$

при $\alpha = 0$, $R_T = 2 \rho \omega v_0^2$ — максимум;

при $\alpha = 180^\circ$, $R_T = 0$.

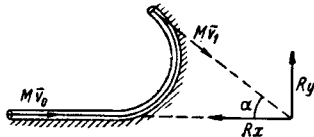


Фиг. 102



Фиг. 103

б) Поверхность произвольной формы (фиг. 104). Давление жидкости в этом случае определяется двумя скрещивающимися силами, приводящими к динамическому венту.



Фиг. 104

Если поток плоский, силы давления приводятся или к паре или к силе.

Теорема Эйлера определяет только главный вектор реакции:

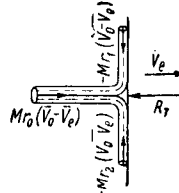
$$R_x = M v_0 (1 + \cos \alpha); \quad R_y = M v_0 \sin \alpha;$$

$$R_T = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = 2 M v_0 \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (215)$$

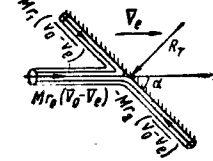
УДАР ЖИДКОСТИ О ДВИЖУЩУЮСЯ ПОВЕРХНОСТЬ

Если поверхность движется равномерно и прямолинейно со скоростью v_e , то величина силы реакции поверхности R_T будет:

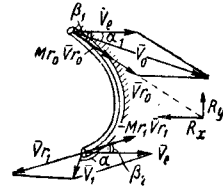
$$\left. \begin{aligned} \text{а) для схемы на фиг. 105} \\ R_T = \rho \omega (v_0 - v_e)^2 \\ \text{б) для схемы на фиг. 106} \\ R_T = \rho \omega (v_0 - v_e)^2 \sin \alpha \\ \text{в) для схемы на фиг. 107} \end{aligned} \right\} \quad (216)$$



Фиг. 105



Фиг. 106



Фиг. 107

$$\left. \begin{aligned} R_x &= M_{r0} (v_0 \cos \alpha_1 - v_1 \cos \alpha_2) \\ R_y &= M_{r0} (v_0 \sin \alpha_1 - v_1 \sin \alpha_2) \end{aligned} \right\}; \quad (217)$$

$$M_{r0} = \rho \cdot \omega \cdot v_{r0}.$$

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР В ТРУБОПРОВОДАХ

Явление гидравлического удара в трубопроводах, наблюдающееся при всяком резком изменении расхода в нём (быстрое закрытие задвижки и т. п.), проявляется в ряде чередующихся волн повышенного и пониженного давления. Повышение давления при гидравлическом ударе обусловлено затратой кинетической энергии потока жидкости на деформацию трубопровода и сжатие жидкости, упругостью которой в этом случае пренебрегать нельзя.

Скорость распространения ударной волны определяется формулой Жуковского

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K D}{E e}}}, \quad (218)$$

где K — модуль упругости жидкости;
 ρ — плотность жидкости;
 E — модуль упругости материала стенок трубы;
 e — толщина стенок трубы;
 D — внутренний диаметр трубы.

Если считать материал стенок абсолютно неупругим ($E = \infty$), то выражение

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

представляет формулу для скорости звука в жидкости.

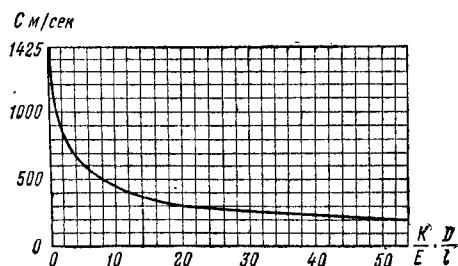
Значения величины $\frac{K}{E}$ и E для воды и наиболее часто встречающихся материалов труб приведены в табл. 65.

Таблица 65

Значения $\frac{K}{E}$ и E для воды и наиболее часто встречающихся материалов труб

| | $\frac{K}{E}$ | E в кг/м ² |
|--------------------------|---------------|-------------------------------|
| Вода | | $K \approx 2,07 \cdot 10^8$ |
| Железо и сталь | 0,01 | $2 \cdot 10^8$ |
| Чугунные трубы | 0,02 | $1 \cdot 10^8$ |
| Бетонные » | 0,1 | $2 \cdot 10^8$ |
| Деревянные » | 0,2 | $1 \cdot 10^8$ |
| Свинцовые » | 0,4 ÷ 10 | $5 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^9$ |

График зависимости скорости C от отношения $\frac{K}{E} \cdot \frac{D}{e}$ (фиг. 108) показывает, что скорость распространения упругих возмущений в трубопроводе по сравнению с



Фиг. 108

обычными скоростями в гидравлике весьма велика, на что в значительной мере оказывает влияние упругость стенок трубопровода.

Скорость распространения ударной волны в воде:

$$C = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + a \frac{D}{e}}} \text{ м/сек,} \quad (219)$$

где $a = 0,5$ для стали и железа;
 $a = 1$ для чугуна и меди;
 $a = 5$ для свинца.

Величина ударного давления $\Delta p = p - p_0$ будет зависеть от продолжительности закрытия задвижки t и длины трубопровода L :

$$1) t < \frac{2L}{C} \text{ (прямой удар).}$$

$$\Delta p = \rho C (v_0 - v), \quad (220)$$

где v_0 и v — скорости течения в трубопроводе до и после закрытия задвижки.

В частном случае при $v = 0$ (полное закрытие задвижки)

$$\Delta p = \rho C v_0 \quad (\text{формула Жуковского}). \quad (221)$$

Л. С. Лейбензон, учитывая неравномерность распределения скоростей по сечению трубы, предложил формулу

$$\Delta p = \rho C v_0 \sqrt{1 + \eta}, \quad (221')$$

одинаково пригодную как для турбулентного, так и для ламинарного режима.

Коэффициент η в этой формуле учитывает неравномерность распределения скоростей и имеет следующие значения:

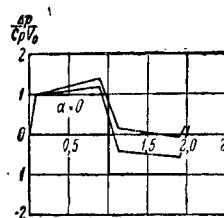
для ламинарного режима $\eta = \frac{1}{3}$,

для турбулентного режима:

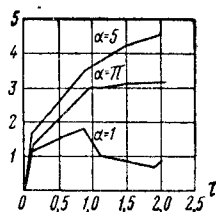
а) в гладких трубах — $\eta \approx 0,015$,

б) в обыкновенных трубах — $\eta \approx 0,035$.

По Чарному И. А., при $v = 0$ величина ударного давления меняется в зависимости от потери на трение в трубопроводе h_f . На фиг. 109 и 110 показано нарастание ударно-



Фиг. 109



Фиг. 110

го давления в зависимости от величины $\alpha = \frac{\Delta p}{\rho C v_0}$.

На графиках охвачен интервал времени

$$0 < \tau = \frac{Ct}{2L} < 2.$$

2) $t > \frac{2L}{C}$ (непрямой удар).

Ввиду того что отражённая волна разрежения пробегит до задвижки за время $t_0 = \frac{2L}{C}$, величину давления, найденного по вышеприведённым формулам, следует уменьшить на величину избыточного давления, имевшего место в момент t_0 .

Если $t \gg \frac{2L}{C}$, то упругим процессом вообще можно пренебречь.

К мерам, предохраняющим трубопроводы от гидравлического удара, относятся:

а) медленное закрытие задвижки; если задано допустимое повышение напора h_g (обычно 20%), то время закрытия задвижки

$$t \geq \frac{L \cdot v_0}{g (h_g \cdot H_0)} \sqrt{h_g},$$

где H_0 — первоначальный напор;

б) устройство воздушных колпаков;

в) устройство предохранительных клапанов.

ИСТЕЧЕНИЕ НЕСЖИМАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ПОСТОЯННОМ УРОВНЕ

КОЭФИЦИЕНТЫ СЖАТИЯ, СКОРОСТИ И РАСХОДА

Вследствие сжатия, которое испытывает струя вытекающей несжимаемой жидкости, можно представить, что истечение происходит не через отверстие площадью ω (фиг. 111), а через сечение ω_c (сечение струи). Отношение $\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}$ называется коэффициентом сжатия.

Так как при истечении жидкость преодолевает ряд гидравлических сопротивлений и, кроме того, имеет место неравномерное распределение скоростей по сечению трубы, то действительная скорость истечения v меньше теоретической v_T ;

$$\frac{v}{v_T} = \varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}} < 1,$$

где α — коэффициент Кориолиса;

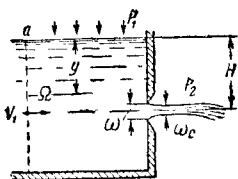
ξ — коэффициент сопротивления.

Коэффициент φ , учитывающий уменьшение скорости истечения, называется коэффициентом скорости.

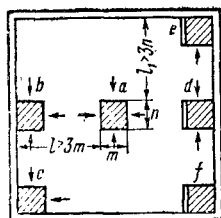
Формула расхода при истечении:

$$Q = \varepsilon \varphi \omega v = \mu \omega v, \quad (222)$$

где $\mu = \varepsilon \varphi = \frac{Q}{\omega v}$ — коэффициент расхода.



Фиг. 111



Фиг. 112

СЖАТИЕ ПОЛНОЕ И НЕПОЛНОЕ, СОВЕРШЕННОЕ И НЕСОВЕРШЕННОЕ

Сжатие струи будет совершенным, если истечение происходит из отверстия a в дне сосуда, в котором (фиг. 112) $l > 3m$ и $l_1 > 3n$.

Сжатие будет неполным, если одна или несколько сторон отверстия имеют направляющие стенки. В угловом отверстии струя сжата лишь с двух сторон, в среднем — с трёх сторон.

В отверстиях e и f струя сжата с одной стороны, в отверстиях d — с двух сторон.

В зависимости от характера сжатия коэффициент сжатия ε принимает различные численные значения.

ИСТЕЧЕНИЕ ИЗ МАЛЫХ ОТВЕРСТИЙ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ

Малыми отверстиями называются отверстия, вертикальный размер которых мал по сравнению с напором жидкости. Если P_1 и

P_2 (фиг. 111) — соответственно давления на свободной поверхности жидкости и на выходе из отверстия, H — глубина погружения центра тяжести отверстия, v_1 — скорость жидкости в сосуде, γ — удельный вес жидкости, то скорость истечения

$$v = \varphi \sqrt{2g \left(H + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right)}. \quad (223)$$

Частные случаи:

1) скоростью v_1 можно пренебречь (размеры отверстия малы по сравнению с поперечным сечением сосуда):

$$v = \varphi \sqrt{2g \left(H + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right)}; \quad (224)$$

2) v_1 незначительно, $P_1 = P_2$:

$$v = \varphi \sqrt{2gH}. \quad (225)$$

Величина расхода Q в общем случае равна:

$$Q = \omega_e v = \mu \omega \sqrt{2g \left(H + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right)}. \quad (226)$$

На величину коэффициента скорости главным образом влияет коэффициент Кориолиса α , а потому с достаточной точностью можно в этом случае принимать $\varphi = 1 : \sqrt{\alpha}$.

При совершенном сжатии коэффициент расхода μ для малых круглых и квадратных отверстий может быть принят равным $\mu = 0,625$.

Для несовершенного сжатия:

для круглых отверстий

$$\mu_0 = \mu (1 + k_1),$$

для прямоугольных отверстий

$$\mu_0 = \mu (1 + k_2),$$

где коэффициенты

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= 0,0456 \left(14,8 \frac{\omega}{\omega_1} - 1 \right), \\ k_2 &= 0,076 \left(9 \frac{\omega}{\omega_1} - 1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (227)$$

(ω — площадь отверстия; ω_1 — площадь сосуда).

Значения k_1 и k_2 , вычисленные по формулам (228), приведены в табл. 66.

Таблица 66
Значения коэффициентов k_1 и k_2

| ω/ω_1 | 0,05 | 0,01 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| k_1 | 0,007 | 0,014 | 0,023 | 0,034 | 0,045 | 0,059 | 0,075 | 0,092 |
| k_2 | 0,009 | 0,019 | 0,030 | 0,042 | 0,056 | 0,071 | 0,088 | 0,107 |

Продолжение табл. 66

| ω/ω_1 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,70 | 0,80 | 0,90 | 1,00 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| k_1 | 0,112 | 0,134 | 0,161 | 0,189 | 0,260 | 0,351 | 0,471 | 0,631 |
| k_2 | 0,128 | 0,152 | 0,178 | 0,208 | 0,278 | 0,365 | 0,473 | 0,608 |

В случае неполного сжатия коэффициент расхода μ может быть определён по формуле

$$\mu' = \mu \left(1 + k \frac{n}{P} \right), \quad (229)$$

где μ — коэффициент расхода при полном сжатии;

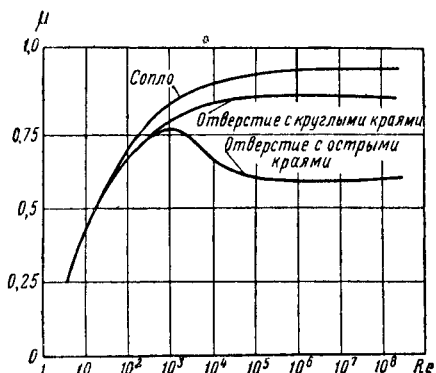
n — длина периметра, испытывающего сжатие;

P — полный периметр отверстия;

k — некоторый коэффициент, величина которого берётся в зависимости от формы отверстия; для круга $k = 0,128$, квадрата $k = 0,152$, прямоугольника $k = 0,157$ (отношение высоты к ширине 1:2).

Все приведённые выше значения коэффициентов расхода относятся к случаю турбулентного режима.

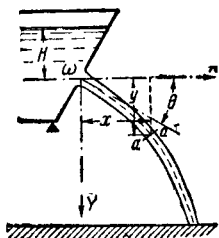
При истечении вязких жидкостей через отверстия в тонкой стенке коэффициент расхода μ зависит от числа Re . Значения $\mu = f(Re)$ представлены на фиг. 113.



Фиг. 113

Траектория струи. Уравнение траектории центра сечения струи, вытекающей из отверстия в наклонной стенке (фиг. 114)

$$y = x \operatorname{tg} \theta + \frac{gx^2}{2v_{cp}^2 \cos^2 \theta}. \quad (230)$$



Фиг. 114

Для вертикальной стенки ($\theta = 0$, $\cos \theta = 1$)

$$y = \frac{gx^2}{2v_{cp}^2}. \quad (231)$$

ИСТЕЧЕНИЕ ИЗ БОЛЬШИХ ОТВЕРСТИЙ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ

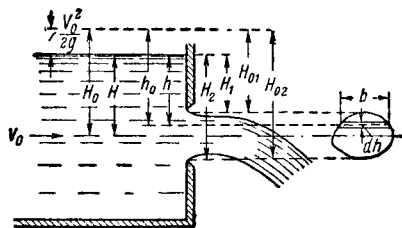
У больших отверстий отношение вертикального размера к напору значительно. В общем случае (отверстие произвольной формы) расход Q определяется уравнением (фиг. 115)

$$Q \cong \int_{H_{o1}}^{H_{o2}} \mu b \sqrt{2g h_0} \cdot dh. \quad (232)$$

Интеграл уравнения (232) можно представить также в виде

$$Q = \mu \omega \sqrt{2g H_0} \left(1 + \frac{I}{8 \omega H_0^2} \right), \quad (233)$$

где $I = \int_{I_1}^{I_2} b y^2 dy$ — момент инерции площади отверстия относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести.



Фиг. 115

• Для прямоугольного отверстия шириной $b = \text{const}$

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} (H_0^{3/2} - H_{o1}^{3/2}), \quad (234)$$

или, пренебрегая скоростью подхода,

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} (H_0^{3/2} - H_1^{3/2}). \quad (235)$$

Выражая H_1 и H_2 через глубину погружения центра тяжести отверстия — H_0 , вместо последнего уравнения получим:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2g H_0} \left(1 - \frac{a^2}{96 H_0^2} \right), \quad (236)$$

где a — высота отверстия.

Анализ последней формулы показывает, что для отверстий, у которых a или $d \leq H_0$, можно пользоваться формулами, приведёнными для малых отверстий (с точностью до 1%).

Значения коэффициента расхода μ в этом случае берутся для прямоугольных отверстий по табл. 67, а для квадратных — по табл. 68.

Таблица 67

**Значения коэффициента μ для прямоугольных
отверстий в зависимости от их размеров и глубины
погружения**

| Напор над верхним кра- ем отверстия в м | Ширина отверстия в м | | | | | | | |
|--|----------------------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | $b = 0,20$ | | | | | $b = 0,60$ | | |
| | высота отверстия в м | | | | | | | |
| | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,10 | 0,20 | 0,02 | 0,20* |
| 0,10 | 0,667 | 0,655 | 0,637 | 0,630 | 0,611 | 0,592 | 0,639 | 0,602 |
| 0,20 | 0,655 | 0,649 | 0,634 | 0,631 | 0,615 | 0,598 | 0,635 | 0,605 |
| 0,30 | 0,650 | 0,645 | 0,632 | 0,630 | 0,616 | 0,600 | 0,633 | 0,607 |
| 0,40 | 0,646 | 0,642 | 0,631 | 0,629 | 0,617 | 0,602 | 0,631 | 0,607 |
| 0,50 | 0,643 | 0,640 | 0,631 | 0,628 | 0,617 | 0,603 | 0,630 | 0,607 |
| 0,70 | 0,638 | 0,637 | 0,629 | 0,627 | 0,616 | 0,604 | 0,628 | 0,607 |
| 0,80 | 0,635 | 0,635 | 0,628 | 0,626 | 0,616 | 0,605 | 0,628 | 0,606 |
| 0,90 | 0,632 | 0,634 | 0,627 | 0,625 | 0,615 | 0,605 | 0,627 | 0,606 |
| 1,00 | 0,629 | 0,632 | 0,627 | 0,625 | 0,615 | 0,605 | 0,626 | 0,605 |
| 1,50 | 0,617 | 0,620 | 0,621 | 0,619 | 0,611 | 0,602 | 0,623 | 0,602 |
| 2,00 | 0,613 | 0,613 | 0,613 | 0,613 | 0,607 | 0,601 | 0,620 | 0,602 |
| 3,00 | 0,606 | 0,608 | 0,607 | 0,606 | 0,603 | 0,601 | 0,615 | 0,601 |

Таблица 68

Значения коэффициента расхода μ при истечении из квадратных отверстий в зависимости от величины напора и ширины отверстия

| Напор в центре отверстия в м | Ширина квадратного отверстия в м | | | | | |
|------------------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,06 | 0,12 | 0,18 |
| 0,20 | 0,648 | 0,624 | 0,617 | 0,605 | 0,598 | — |
| 0,30 | 0,636 | 0,619 | 0,613 | 0,605 | 0,601 | 0,599 |
| 0,50 | 0,628 | 0,618 | 0,610 | 0,605 | 0,602 | 0,601 |
| 1,00 | 0,620 | 0,610 | 0,607 | 0,605 | 0,604 | 0,603 |
| 1,50 | 0,618 | 0,609 | 0,606 | 0,604 | 0,603 | 0,602 |
| 2,00 | 0,614 | 0,608 | 0,605 | 0,604 | 0,603 | 0,602 |
| 3,00 | 0,611 | 0,606 | 0,604 | 0,603 | 0,602 | 0,601 |
| 6,00 | 0,605 | 0,603 | 0,602 | 0,602 | 0,601 | 0,600 |
| 15,00 | 0,601 | 0,601 | 0,600 | 0,600 | 0,599 | 0,599 |
| 30,00 | 0,598 | 0,598 | 0,598 | 0,598 | 0,598 | 0,598 |

Для практических расчётов Павловский рекомендует брать следующие значения коэффициента расхода μ :

- | | |
|--|-----------|
| 1. Отверстия средних размеров со сжатием струи со всех сторон при отсутствии направляющих стенок | 0,65 |
| 2. Отверстия больших размеров с несовершенным, не всесторонним сжатием | 0,70 |
| 3. Доинные отверстия со значительным влиянием бокового сжатия | 0,65—0,70 |
| 4. Доинные отверстия с умеренным влиянием бокового сжатия | 0,70—0,75 |
| 5. Доинные отверстия с плавными боковыми подходами | 0,80—0,85 |
| 6. Исключительные случаи весьма плавных подходов воды к отверстию со всех сторон . . | 0,90 |

В табл. 69 и 70 даны значения коэффициента расхода для искусственных сооружений в дорожном полотне по нормам МПС.

¹ Значения в этой графе соответствуют отверстию в доске толщиной 5 см.

Таблица 69

Значения коэффициента расхода в зависимости от типа опор малых мостов и труб

| Тип моста или трубы | ρ |
|---|------|
| Мосты с конусами и трубы независимо от их очертания, с расходящимися откосными крыльями . . | 0,90 |
| Мосты без конусов и трубы независимо от их очертания, без расходящихся откосных крыльев, а также трубы, срезаемые в плоскости откоса насыпи | 0,80 |
| Трубы с выпущенными из тела насыпи концами, а также арочные мосты с затопленными пятями . . | 0,75 |

Т а б л и ц а 70

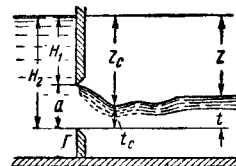
Значения коэффициента расхода для мостов разных
отверстий при коэффициенте скорости $\varphi = 0,95$

| Отверстия в м | Коэффициент сжатия ε | Коэффициент расхода μ |
|---------------|----------------------------------|---------------------------|
| 4 | 0,80 | 0,80 |
| 6 | 0,85 | 0,80 |
| 10 | 0,90 | 0,85 |
| 20 | 0,95 | 0,90 |
| 200 | 1,00 | 0,95 |

ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ ЗАТОПЛЕННОЕ И ПОЛУЗАТОПЛЕННОЕ ОТВЕРСТИЯ

В случае истечения через затопленное отверстие (истечение под уровень) формулы и коэффициенты одинаковы с таковыми при истечении в атмосферу.

Рассматривая расход через полузатопленное отверстие (Фиг. 116) как сумму расходов—расхода Q через незатопленную часть высотой $(a-t)$ и расхода Q через затопленную часть высотой t , получают известную формулу:



Фиг. 116

$$Q = \mu b V \sqrt{2g} \left[\frac{2}{3} (Z^{3/2} - H_1^{3/2}) + t V \overline{Z} \right], \quad (237)$$

где b — ширина отверстия,

ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ НАСАДКИ

Насадками называются короткие трубки $[L \leq (3 \div 4) d]$ разнообразных форм и размеров, через которые происходит истечение.

Конoidalные насадки (фиг. 117) по форме выходящей струи имеют наибольшие коэффициенты расхода μ , значения которых в зависимости от величины напора приведены в табл. 71.

* Коэффициент расхода μ показан с округлением до 0,05.

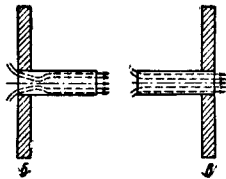
Таблица 71
Значения коэффициентов расхода и скорости для коноидальных насадок

| Напор H в м | 0,02 | 0,05 | 3,5 | 17 | 103 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\mu = \varphi$ | 0,959 | 0,967 | 0,975 | 0,994 | 0,994 |

Цилиндрические насадки Борда и Вентури (фиг. 118). При $L \leq (3 \div 4) d$ коэффициент сжатия $\varepsilon = 1$, $\mu = \varphi$. Коэффициент скорости φ в этих насадках несколько меньше, чем в



Фиг. 117



Фиг. 118

других, вследствие потери напора на расширение струи в насадке. В табл. 72 приведены значения коэффициентов ε , φ и μ .

Таблица 72
Значение коэффициентов скорости, сжатия и расхода насадок Вентури и Борда

| Тип насадки | Коэффициент скорости φ | Коэффициент сжатия ε | Коэффициент расхода μ |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Вентури | 0,82 | 1,0 | 0,82 |
| Борда: | | | |
| с толстой стенкой | 0,82 | 1,0 | 0,82 |
| с тонкой стенкой | 0,71 | 1,0 | 0,71 |

Влияние угла наклона оси насадки Вентури на величину коэффициента расхода μ может быть выражено данными, приведёнными в табл. 73.

Таблица 73
Зависимость коэффициента расхода от угла, образуемого осью насадки Вентури с нормально к поверхности резервуара

| α | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| μ | 0,815 | 0,799 | 0,782 | 0,764 | 0,747 | 0,731 | 0,712 |

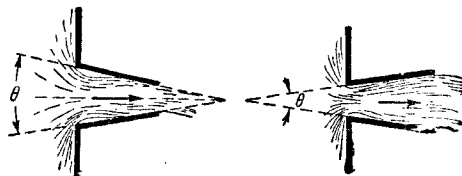
Напор, при котором в сжатом сечении насадки давление равно давлению паров жидкости при данной температуре, называется критическим напором. Напор более критического делает истечение аналогичным истечению через отверстие в тонкой стенке (струя не касается стенок насадки):

$$H_{кр} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \cdot \frac{h_y}{2\varphi^2}, \quad (238)$$

где h_y — упругость паров в метрах столба жидкости.

Конические насадки (фиг. 119). Конические насадки различают сходящиеся и расходившиеся. В сходящихся конических на-

садках с увеличением угла конусности коэффициент сжатия ε падает, а коэффициент скорости φ растёт. Максимальный коэффициент расхода μ соответствует углу конусности $13^\circ 23'$.



Фиг. 119

В табл. 74 приведены средние значения коэффициентов скорости и расхода для конических сходящихся насадок.

Таблица 74
Значения коэффициентов расхода, скорости и сжатия для конических сходящихся насадок

| Углы θ | 0° | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 8° | 10° |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Коэффициент расхода μ | 0,829 | 0,873 | 0,892 | 0,909 | 0,920 | 0,925 | 0,931 | 0,937 |
| Коэффициент скорости φ | 0,829 | 0,873 | 0,892 | 0,909 | 0,920 | 0,925 | 0,933 | 0,949 |
| Коэффициент сжатия ε | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,998 | 0,987 |

Продолжение табл. 74

| Углы θ | 12° | 13° 23' | 16° | 25° | 30° | 35° | 45° |
|--|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Коэффициент расхода μ | 0,942 | 0,946 | 0,938 | 0,908 | 0,896 | 0,883 | 0,857 |
| Коэффициент скорости φ | 0,955 | 0,963 | 0,969 | 0,974 | 0,975 | 0,977 | 0,983 |
| Коэффициент сжатия ε | 0,986 | 0,982 | 0,968 | 0,932 | 0,919 | 0,904 | 0,857 |

В расходившихся конических насадках коэффициент расхода имеет меньшую величину по сравнению с насадками, упомянутыми выше. Для насадок длиной $l < 10$ см коэффициент расхода μ (линейные размеры в м):

$$\left. \begin{aligned} \text{для острых входных кромок} \\ \mu = 0,184 n \sqrt[4]{l} \\ \text{для закруглённых входных кромок} \\ \mu = 0,287 n \sqrt[4]{l}. \end{aligned} \right\} \quad (239)$$

Коэффициент n , зависящий от угла конусности, берётся по табл. 75.

Таблица 75
Значения коэффициента n в формулах (239)

| Угол θ | 1° | 2° | 3° | 4° | 5° |
|-----------------|------|------|------|------|-------|
| Коэффициент n | 8,18 | 8,83 | 9,53 | 10,2 | 10,63 |

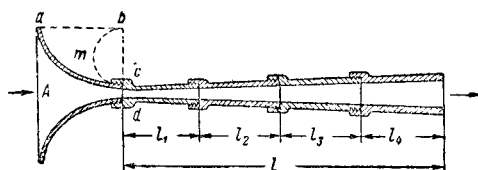
Сочетания сходящихся и расходившихся насадок наиболее выгодны в отношении воз-

Гидравлические характеристики отверстий

Таблица 76

| Род отверстия | Коэффициент скорости φ | Коэффициент расхода μ | Скоростной напор $\frac{v^2}{2g} = \varphi^2 H_0$ | Работоспособность струи $Q \gamma \varphi^2 H_0$ | Коэффициент сопротивления ξ | Примечание |
|--|--------------------------------|---------------------------|---|--|---------------------------------|---|
| Круглое отверстие в тонкой стенке | 0,97 | 0,62 | 0,95 H_0 | 0,59 A | 0,06 | $A = \gamma \omega \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}$ |
| Цилиндрическая наружная насадка (Вентури) | 0,82 | 0,82 | 0,67 H | 0,55 A | 0,5 | |
| Коническая сходящаяся насадка при угле конусности $13^\circ 40'$ | 0,96 | 0,96 | 0,93 H_0 | 0,88 A_c | 0,09 | $A_c = \gamma \omega_c \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}$ $A_c < A$ |
| Коническая расходящаяся насадка | 0,48 | 0,48 | 0,23 H_0 | 0,11 A_p | 3,3 | |
| Насадки коноидальные (по форме струи) | 0,93 | 0,93 | 0,96 H_0 | 0,94 A_c | 0,04 | $A_p = \gamma \omega_p \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}$ $A_p > A$ $A_c < A$ |
| Внутренний цилиндр (насадка Борда) | 0,71 | 0,71 | 0,5 H_0 | 0,36 A | 1 | |

возможности увеличения коэффициента расхода μ (фиг. 120).

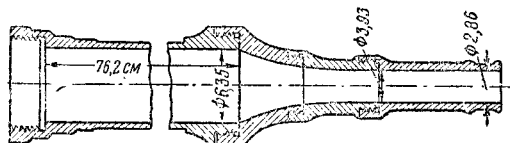


Фиг. 120

В табл. 76 даны гидравлические характеристики отверстий с насадками и без них.

НАКОНЕЧНИКИ ПОЖАРНЫХ РУКАВОВ

Пожарный рукав кончается брандспойтом, состоящим из ствола, конической на-



Фиг. 121. Насадок пожарный

садки и срыска (цилиндрическая трубка, обеспечивающая параллельность выходящих струй).

В табл. 77 приведены значения коэффициентов расхода μ в зависимости от диаметра срыска для брандспойтов, подобным изображенному на фиг. 121.

Таблица 77

Зависимость коэффициентов расхода и скорости от диаметра срыска

| d_c в мм | 19 | 22 | 25 | 30 | 32 | 35 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\mu = \varphi$ | 0,983 | 0,982 | 0,980 | 0,976 | 0,971 | 0,959 |

Теоретическая горизонтальная дальность полёта струи при наклоне наконечника к горизонту под углом θ определяется из уравнения траектории (230) при $y = 0$:

$$x = \frac{v_0^2 \cdot \sin 2\theta}{g};$$

$$x_{\max} = \frac{v_0^2}{g} \text{ (при } \theta = 45^\circ \text{)}. \quad (240)$$

Высота боя пожарных струй равна

$$h = \frac{H_e}{1 + n \cdot H_e}, \quad (241)$$

где H_e — полный напор в начале ствола;

$$n = \frac{0,00025}{d + (10d)^3};$$

d — диаметр срыска в м.

ИСТЕЧЕНИЕ НЕСЖИМАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ УРОВНЕ

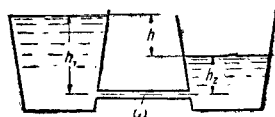
ИСТЕЧЕНИЕ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ УРОВНЕ ПОД ПЕРЕМЕННЫМ УРОВНЕМ

В общем случае при переменных площадях поперечных сечений резервуаров ω_1 и ω_2 (фиг. 122) время понижения горизонта жидкости от первоначальной разности уровней H в резервуарах до разности h равно

$$t = - \frac{1}{\mu \omega \sqrt{2g}} \int_h^H \frac{\omega_1 \cdot \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \cdot \frac{dh}{\sqrt{h}}. \quad (242)$$

В частном случае призматических резервуаров (фиг. 123) ($\omega_1 = \text{const}$; $\omega_2 = \text{const}$):

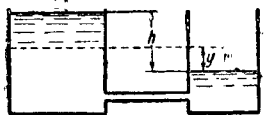
$$t = \frac{2 \omega_1 \cdot \omega_2 (\sqrt{H} - \sqrt{h})}{(\omega_1 + \omega_2) \mu \omega \sqrt{2g}}. \quad (243)$$



Фиг. 122

Время выравнивания уровней

$$t = \frac{2 \omega_1 \omega_2 \sqrt{H}}{(\omega_1 + \omega_2) \mu \omega \sqrt{2g}}. \quad (244)$$



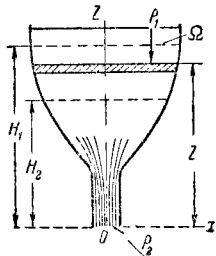
Фиг. 123

Горизонт выравнивания

$$y = \frac{\omega_1 H}{\omega_1 + \omega_2}. \quad (245)$$

ВРЕМЯ ОПОРОЖНЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ

Для тех случаев истечения, когда изменение скорости совершается весьма медленно и представляется возможным рассматривать движение как установившееся, справедливы следующие формулы:



Фиг. 124

Основное уравнение (фиг. 124)

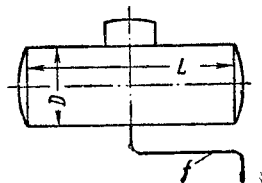
$$t = \int_{z_1=H_1}^{z_2=H_2} \frac{\Omega dz}{\mu \omega \sqrt{2g \left(z + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right)}}. \quad (246)$$

Если $\Omega = f(z) = \text{const}$ (призматический резервуар), то

$$t = \frac{2\Omega}{\mu \omega \sqrt{2g}} \left(\sqrt{H_1 + \frac{P_1 - P_2}{\gamma}} - \sqrt{H_2 + \frac{P_1 - P_2}{\gamma}} \right). \quad (247)$$

ИСТЕЧЕНИЕ ИЗ ЖЕЛ.-ДОР. ЦИСТЕРН

а) Истечение через короткий патрубок $P_1 = P_2$.



Фиг. 125

Время опорожнения (фиг. 125)

$$t = \frac{4 LD \sqrt{D}}{3 \mu f \sqrt{2g}}, \quad (248)$$

где f — площадь поперечного сечения патрубка.

Значения коэффициента расхода μ в зависимости от кинематического коэффициента вязкости приведены в табл. 78 (по Лейбензону Л. С.).

Таблица 78
Ориентировочные значения коэффициента расхода μ в зависимости от кинематического коэффициента вязкости

| ν в $\text{см}^2/\text{сек}$ | 0,01 — 0,1 | 0,69 | 5,5 |
|----------------------------------|------------|------|------|
| μ | 0,61 | 0,34 | 0,24 |

б) Истечение через трубопровод (по Яблонскому В. С.):

$$t = \frac{4}{3} \frac{LD \sqrt{D}}{\mu f \sqrt{2g}} \left\{ \sqrt{1 + \frac{h_0}{D}} \left[\left(2 \frac{h_0}{D} + 1 \right) E_1 - 2 \frac{h_0}{D} F_1 \right] \right\}, \quad (249)$$

где L — длина цистерны;
 D — диаметр цистерны;

h_0 — дополнительный напор;

E_1 и F_1 — полные эллиптические интегралы.

Значения функции φ_0 , стоящей в фигурных скобках, в зависимости от $\frac{h_0}{D}$ даны в табл. 79.

Таблица 79
Значение функции φ_0 в зависимости от $\frac{h_0}{D}$

| $\frac{h_0}{D}$ | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 3 | 5 |
|-----------------|---|-----|-----|------|------|------|
| φ_0 | 1 | 0,6 | 0,5 | 0,33 | 0,31 | 0,24 |

в) По Чарному И. А., истечение вязких нефтепродуктов из жел.-дор. цистерн может протекать при двух режимах движения в трубопроводе — турбулентном в начале и ламинарном в конце.

Время истечения при турбулентном режиме

$$t_T \approx \frac{\pi LD}{2 \mu f \sqrt{2g}} \left[\sqrt{h_0 + D} - \sqrt{h_0 + z_{кр}} \right]. \quad (250)$$

Время истечения при ламинарном режиме

$$t_L \approx \frac{32 \nu L D L}{g d^4} \ln \frac{h_0 + z_{кр}}{h_0}. \quad (251)$$

Полное время истечения $T = t_T + t_L$

Здесь $z_{кр}$ — высота нефтепродукта в цистерне, отвечающая переходу турбулентного режима в ламинарный

$$z_{кр} = \left(\frac{\nu \cdot Re_{кр}}{\mu d \sqrt{2g}} \right)^2 - h_0. \quad (252)$$

l — приведённая длина сливного трубопровода с диаметром d ;

ν — кинематическая вязкость нефтепродукта;

μ — коэффициент расхода;

$Re_{кр} = 2300$.

Если истечение совершается только при турбулентном режиме, то $z_{кр} = 0$, если только при ламинарном, $z_{кр} = D$.

ВНЕШНЕЕ ОБТЕКАНИЕ ТЕЛ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В общем случае сопротивление обтекаемого тела складывается из:

- а) сопротивления трения;
- б) сопротивления формы (давления), обусловливаемого возмущающим действием вязкости на спектр линий тока (происходит отрывание пограничного слоя);
- в) сопротивления деформации, представляющего собой ту энергию деформации, которая преобразуется в теплоту вдали от тела. В отличие от сопротивления трения сопротивление деформации имеет место при очень небольших скоростях и размерах тела или для очень вязких жидкостей (при $Re \ll 1$);
- г) волнового сопротивления (если тело движется на границе двух жидкостей), обусловливающего потерю энергии на волнообразование.

Сопротивление, которое оказывает жидкость движущемуся телу, таким образом, зависит от формы и положения тела, от размеров его, от скорости движения и рода жидкости.

ОБЩИЙ ЗАКОН СОПРОТИВЛЕНИЯ

Когда одновременно действуют силы инерции, вязкости, тяжести и имеет место сжимаемость, закон сопротивления выражается в виде

$$W = f(Re, Fr, Ma) \cdot F \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (253)$$

где W — сопротивление равномерно движущегося тела;

F — проекция тела на плоскость, перпендикулярную направлению течения;

ρ — плотность жидкости;

v — скорость движения тела относительно невозмущенной жидкости;

$f(Re, Fr, Ma) = c$ — коэффициент сопротивления;

Re — критерий (параметр) Рейнольдса;

Fr — критерий (параметр) Фруда;

$Ma = \frac{v}{c_0}$; Ma — критерий Маха;

c_0 — скорость звука в невозмущенной жидкости.

При $\frac{v}{c_0} \ll 1$ сжимаемостью можно пренебречь.

Тогда

$$c = f(Re, Fr).$$



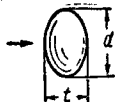


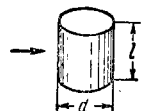
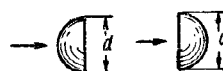
Теоретическое определение $c = f(Re, Fr)$ при современном состоянии теории не представляется возможным.

В табл. 80 приведены коэффициенты сопротивления различных тел.



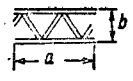
Таблица 80

Коэффициенты сопротивления различных тел

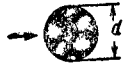
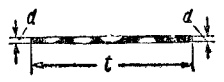
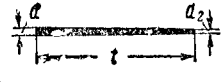

а) Пространственное обтекание

| | | | |
|--|--|--|----------------|
|  | | | c |
| Шар для $\frac{vd}{v} < 1$ $c = \frac{24v}{vd} \left(1 + \frac{3vd}{16v}\right)$ | $\frac{vd}{v} = 4 \cdot 10^5$ | | 0,09 |
| | $\frac{vd}{v} = 10^6$ | | 0,13 |
| | $2 \cdot 10^4 < \frac{vd}{v} < 1,5 \cdot 10^5$ | | 0,47 |
|  | | | |
| Вытянутый эллипсоид 5:9 | $\frac{vd}{v} > 10^5$ | | 0,05 до 0,1 |
|  | | | |
| Сжатый эллипсоид 4:3 | $\frac{vd}{v} > 5,5 \cdot 10^5$ | | 0,2 |
| | $\frac{vd}{v} < 4,5 \cdot 10^5$ | | 0,6 |
|  | | | |
| Круглая пластинка | — | | 1,11 |
|  | | | |
| Круговой цилиндр, продуваемый параллельно образующей | $\frac{l}{d} = 1$ | | 0,91 |
| | 2 | | 0,85 |
| | 4 | | 0,87 |
| | 7 | | 0,99 |
|  | | | |
| Круговой цилиндр, продуваемый перпендикулярно образующей | $\frac{l}{d} = 1$ | | 0,63 |
| | 2 | | 0,68 |
| | 5 | | 0,74 |
| | 10 | | 0,82 |
| | 40 | | 0,98 |
| | ∞ | | 1,20 |
|  | | | |
| Полушар (без ограничивающей плоскости) | Выпуклый Вогнутый | | 0,24 1,23 |

Продолжение табл. 80



| | | | | | |
|---|--|--|---------------------------------|--|--|
|  | | | c | | |
|  | | | | | |
| Конус (с плоскостью основания) | | | Угловое отверстие 60° | | |
| | | | Угловое отверстие 30° | | |
| | | | 0,51 | | |
| | | | 0,34 | | |
|  | | | | | |
| Решётчатая ферма (ω — сумма площадей отдельных стержней) | | | $0,2 < \frac{\omega}{ab} < 0,5$ | | |
| | | | От 1,5 до 1,7 | | |

б) Плоско-параллельное течение

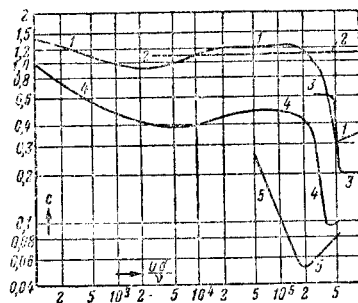
| | | | | | |
|---|--|--|---------------------------------|--|--|
|  | | | c | | |
| | | | (F = l · d) | | |
| Круговой цилиндр для $\frac{vd}{\nu} < 0,2$ | | | $\frac{vd}{\nu} > 5 \cdot 10^5$ | | |
| $c = \frac{8\pi\nu}{vd(2,0 - \ln \frac{vd}{\nu})}$ | | | $\frac{vd}{\nu} < 2 \cdot 10^5$ | | |
| Проволока | | | Около 1,1 | | |
|  | | | | | |
| Пластина с краями, закруглёнными по дуге окружности | | | $\frac{vt}{\nu} = 5 \cdot 10^5$ | | |
| $\frac{d}{t} = 0,0333$ | | | $\frac{vt}{\nu} = 2 \cdot 10^5$ | | |
| | | | 0,78 | | |
| | | | 0,66 | | |
|  | | | | | |
| Клинообразная пластина | | | $\frac{vt}{\nu} = 5 \cdot 10^5$ | | |
| $\frac{d_1}{t} = 0,0417$ | | | $\frac{vt}{\nu} = 2 \cdot 10^5$ | | |
| $\frac{d_2}{t} = 0,025$ | | | | | |
| | | | 0,53 | | |
| | | | 0,46 | | |
|  | | | | | |
| Профили различной толщины: | | | $\frac{vt}{\nu} \approx 10^5$ | | |
| $\frac{d}{t} = 0,055$ | | | | | |
| 0,125 | | | | | |
| 0,197 | | | | | |
| | | | 0,193 | | |
| | | | 0,096 | | |
| | | | 0,080 | | |

Поверхность обтекаема полностью, покрытым аэродинамическим

Продолжение табл. 80

| | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|
|  | | | c | | |
| | | | F = l · d | | |
| Профилированная проволока | | | $\frac{vd}{\nu} \approx 3 \cdot 10^5$ | | |
| | | | до 10^4 | | |
| | | | 0,3 | | |
| | | | до 0,4 | | |
|  | | | $\frac{vd}{\nu} > \text{прибл. } 5 \cdot 10^5$ | | |
| Профилированная стальная труба (каплеобразный профиль) | | | | | |
| $\frac{d}{t} = 1/2$ | | | | | |
| | | | 0,2 | | |
| $\frac{d}{t} = 1/3$ | | | | | |
| | | | 0,1 | | |

На фиг. 126 приведены коэффициенты сопротивления c в зависимости от числа Re для цилиндра (1), пластинки (2), сплюснутого эллипсоида (3), шара (4) и удлиненного эллипсоида (5).



Фиг. 126

Если полное сопротивление состоит в основном из сопротивления трения, то для гладких пластинок, параллельных направлению потока:

а) при $Re < 5 \cdot 10^5$ (ламинарный пограничный слой)

$$c = \frac{1,327}{\sqrt{Re}}; \quad (254)$$

б) при $Re > 5 \cdot 10^5$ (турбулентный пограничный слой)

$$c = \frac{0,072}{\sqrt{Re}}; \quad (255)$$

в) при $5 \cdot 10^5 < Re < 5 \cdot 10^6$

$$c = \frac{0,074}{\sqrt{Re}} - \frac{1700}{Re}. \quad (256)$$

Если полное сопротивление — в основном сопротивление деформации, коэффициент со-

* В формуле (252) в этом случае F — площадь пластинки.

противления c пропорционален первой степени скорости, т. е.

$$c = \frac{a}{vl} = \frac{a}{Re}, \quad (257)$$

где a — постоянный коэффициент;
 l — какая-либо характерная длина тела.

В случае волнового сопротивления формулу (253) применяют в виде

$$W = c \cdot l^2 \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (258)$$

где l — длина тела.

Коэффициент $c = f(Fr)$.

Для глубокой воды $\left(t > \frac{l}{2}\right)$,

$$c = a \frac{v^2}{gl} + b \cos \frac{gL}{v^2}, \quad (259)$$

где a и b — постоянные, зависящие от формы тела;

L — длина, на которой образуются волны.

При $\frac{gL}{v^2} = \frac{2n+1}{2}$ c имеет минимум,

при $\frac{gL}{v^2} = n$ — максимум; n — целое число.

Для мелкой воды ($t \ll l$) скорость волн

$$u = \sqrt{gt} \quad (260)$$

и не зависит от длины волны (t — глубина воды).

При $v \approx \sqrt{gt}$ наблюдается сильно выраженный максимум сопротивления; при $v > \sqrt{gt}$ сопротивление несколько меньше, чем при той же скорости на глубокой воде.

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ В ВОСХОДЯЩЕМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

Все нижеприведенные формулы даны для случая обтекания шара диаметром d с удельным весом γ_1 , потоком жидкости в трубе

диаметром D или в межтрубном пространстве труб диаметром D_1 и D_2 .

Под критической скоростью восходящего потока понимают такую скорость течения, при которой тело остаётся взвешенным в жидкости и не падает.

Число Re в случае обтекания шара выражается через диаметр шара d и скорость потока жидкости v .

1. Формула Стокса (ламинарный режим; $Re < 2$):

$$v_{кр} = \frac{gd^2}{18\nu} \left(\frac{\gamma_1}{\gamma} - 1 \right), \quad (261)$$

ν — кинематическая вязкость, а γ — удельный вес жидкости.

Границы применения формулы:

а) движение внутри трубы

$$\frac{d}{D} < \frac{2}{2300};$$

б) движение в затрубном пространстве

$$\frac{d}{D_1 - D_2} < \frac{2}{2300}.$$

2. Формула Риттингера (турбулентный режим; $Re > 300$):

$$v_{кр} = k \sqrt{\left(\frac{\gamma_1}{\gamma} - 1 \right) d}, \quad (262)$$

где $k = \sqrt{\frac{4g}{3\varphi}}$;

φ — коэффициент формы, определяемый из опыта.

При $Re > 10\,000$ коэффициент $\varphi \approx 0,5$.

3. Формула Аллена (промежуточный режим; $2 < Re < 300$):

$$v_{кр} = \frac{k'd}{\sqrt{\frac{\gamma_1}{\gamma} - 1}} \left(\frac{\gamma_1}{\gamma} - 1 \right)^{2/3}, \quad (263)$$

где $k' = \left(\frac{4g}{3\alpha} \right)^{2/3}$; $\alpha \approx 10$.

ДВИЖЕНИЕ ГРУНТОВЫХ ВОД

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Грунтовыми водами называются воды, насыщающие пористые пласты, подстилаемые водонепроницаемым пластом.

Движение грунтовых вод является частным случаем фильтрации — движения однородной жидкости в пористой среде.

Рассматривая движение грунтовых вод, под термином «грунтовая вода» подразумевают воду, которая заполняет все поры грунта и способна передвигаться под действием сил тяжести («гравитационная вода»).

Движение грунтовых вод может быть напорным (артезианские колодцы) и безнапорным (фильтрация через тело плотины и т. д.).

Если W — объем грунта, w — объем содержащихся в нём частиц, Ω — площадь сечения выделенного объема грунта и ω — площадь,

занимаемая сечениями частиц грунта, то

$m = \frac{W - w}{W}$ называется коэффициентом порозности, а $n = \frac{\Omega - \omega}{\Omega}$ — коэффициентом пористости.

ОСНОВНОЙ ЗАКОН ФИЛЬТРАЦИИ

На основе тщательно проведенных многочисленных опытов Дарси установил основной закон фильтрации, который выражается уравнением:

$$\left. \begin{aligned} Q &= K \omega I = -K \omega \frac{dH}{dL} \\ \text{или} \\ v &= KI = K \frac{dH}{dL} \end{aligned} \right\}, \quad (264)$$

где K — коэффициент фильтрации, зависящий от свойств пористой среды и свойств жидкости; имеет размерность скорости;

Q — расход;

v — скорость фильтрации;

$I = -\frac{dH}{dL}$ — гидравлический градиент;

H — потеря напора на пути фильтрации L ;

ω — площадь поперечного сечения потока.

Если ввести понятие о коэффициенте проницаемости K_n , который связан с коэффициентом фильтрации соотношением

$$\frac{K}{\gamma} = \frac{K_n}{\mu} \quad (265)$$

(μ — абсолютная вязкость жидкости), то закон Дарси можно представить в виде

$$v = -\frac{K_n}{\mu} \cdot \frac{dp}{dL}. \quad (266)$$

Размерность коэффициента проницаемости K_n — (см^2).

Единица проницаемости:

$$\frac{1}{981 \cdot 10^6} \text{ см}^2 \approx 10^{-8} \text{ см}^2 = 1 \text{ Дарси.}$$

С введением понятия о K_n коэффициент пропорциональности в формуле Дарси оказывается расщеплённым на две константы: K_n и μ , одна из которых зависит только от свойств пористой среды, другая — только от свойств жидкости.

Критерии существования закона Дарси. При больших скоростях фильтрации закон Дарси может нарушаться вследствие: а) влияния сил инерции, которыми пренебрегают при выводе закона Дарси; б) появления турбулентности.

По Павловскому, фильтрационный поток в однородном грунте переходит из ламинарного в турбулентный при

$$Re_{\text{кр}} = \frac{1}{(0,75m + 0,23)} \cdot \frac{vd}{\nu}, \quad (267)$$

где d — диаметр зёрен грунта;

ν — кинематическая вязкость жидкости.

Для воды $Re_{\text{кр}} \approx 7 \div 9$.

Для неоднородных грунтов, по Щелкачёву В. Н.

$$Re_{\text{кр}} = \frac{10}{m^{2,3}} \cdot \frac{v \sqrt{K_n}}{\nu}.$$

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГРУНТОВОГО ПОТОКА

Невозможность учесть движение жидкости в каждой из отдельных пор заставляет ввести понятие фиктивной жидкости, сплошь заполняющей каждую точку пространства вне зависимости от того, чем занята эта точка в действительности: частицей грунта или воды.

При замене движения действительной жидкости фиктивной должны быть удовлетворены следующие основные условия:

1) произведение скорости фильтрации на величину элементарной площадки должно равняться действительному расходу фильтрующей через эту площадку жидкости;

2) плотность фиктивной жидкости должна быть равна плотности действительной жидкости.

Пренебрегая силами трения внутри самой жидкости, которые будут незначительны по сравнению с силами сопротивления грунтового скелета, рассматриваемыми в этом случае как силы объёмные, можно применить к грунтовому потоку уравнения движения идеальной жидкости (уравнения Эйлера).

Если внести компоненты сил сопротивления грунтового скелета

$$x' = -\frac{\mu}{K_n \rho} v_x; \quad y' = -\frac{\mu}{K_n \rho} v_y; \\ z' = -\frac{\mu}{K_n \rho} v_z$$

в уравнения Эйлера наряду с компонентами силы тяжести, то уравнения (26) приводятся к уравнениям движения грунтовых вод Н. Е. Жуковского:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\mu}{K_n} v_x + \frac{\partial p}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\mu}{K_n} v_y + \frac{\partial p}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\mu}{K_n} v_z + \frac{\partial p}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\} \quad (268)$$

Пренебрегая силами инерции и имея в виду, что

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\gamma} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\gamma} - z \right) = \frac{\partial H}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p}{\gamma} \right) &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p}{\gamma} - z \right) = \frac{\partial H}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (269)$$

можно уравнения Н. Е. Жуковского представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= -\frac{K_n \cdot \gamma}{\mu} \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \\ v_y &= -\frac{K_n \cdot \gamma}{\mu} \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \\ v_z &= -\frac{K_n \cdot \gamma}{\mu} \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (270)$$

Система этих уравнений представляет закон Дарси в обобщённом виде.

Из уравнений (270) следует, что

$$H = f(x, y, z). \quad (271)$$

Последняя функция носит название напорной функции.

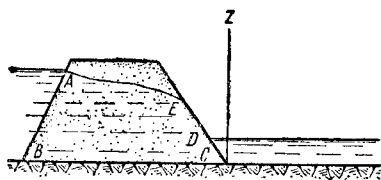
Обозначив $\frac{K_n}{\mu} \gamma H = \Phi$, можно систему уравнений (270) записать иначе:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= -\frac{\partial \Phi}{\partial x} \\ v_y &= -\frac{\partial \Phi}{\partial y} \\ v_z &= -\frac{\partial \Phi}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (272)$$

Функция $\Phi = \Phi(x, y, z) = \frac{K_n}{\mu} \gamma H$ есть потенциал скоростей. Таким образом движение грунтовых вод в пределах закона Дарси является потенциальным. Следовательно, задача о движении грунтовых вод сводится к решению уравнения Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0. \quad (273)$$

Для грунтовых вод границами области движения могут быть (фиг. 127):



Фиг. 127

а) непроницаемая граница BC ; скорость фильтрации в любой точке направлена по касательной, т. е.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0; \quad (274)$$

если известно уравнение граничной кривой $F(x, y, z) = 0$, то кинематическое условие (269) может быть выражено производной:

$$v_x \frac{\partial F}{\partial x} + v_y \frac{\partial F}{\partial y} + v_z \frac{\partial F}{\partial z} = 0; \quad (275)$$

б) границы водоёмов AB и DC ; из-за малости скоростей фильтрации можно полагать распределение давления по гидростатическому закону

$$\frac{p}{\gamma} = \frac{p_a}{\gamma} + (H - z), \quad (276)$$

где p_a — давление на свободной поверхности водоёма; H — отметка этой поверхности, отнесённая к горизонтальной координатной плоскости;

в) граница выклинивания ED ; грунтовые воды примыкают к атмосферному воздуху и давление таким образом можно считать постоянным;

г) свободная поверхность AE ; пренебрегая явлением капиллярности, можно считать

давление постоянным и приблизительно равным атмосферному. Так как форма свободной поверхности неизвестна, то условие постоянства давления является недостаточным.

Для установившегося движения в первом приближении дополнительным условием можно считать равенство нулю нормальной составляющей скорости фильтрации.

Нахождение потенциальной функции $\Phi(x, y, z)$, удовлетворяющей уравнению Лапласа и конкретным граничным условиям, в общем случае трёхразмерной задачи, представляет известные трудности; значительно проще решение задач установившегося движения плоского потока.

ПЛОСКОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ГРУНТОВОГО ПОТОКА

В ряде инженерных задач (в случае идентичности движения потока по его ширине) представляется возможным свести задачу к изучению двухразмерного движения в одной плоскости.

Для плоского потока справедливы уравнения (51) и (52):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (277)$$

где в общем виде функция потенциала скоростей Φ в зависимости от расположения потока будет выражаться:

а) при вертикальном расположении плоского потока

$$\Phi = \frac{K_n}{\mu} \gamma H = \frac{K_n}{\mu} \gamma \left(y + \frac{p}{\gamma} \right); \quad (278)$$

б) при горизонтальном расположении плоского потока

$$\Phi = \frac{K_n}{\mu} \gamma H = \frac{K_n}{\mu} p. \quad (279)$$

Для плоского плавно изменяющегося грунтового потока со свободной поверхностью при горизонтальном подстилающем слое, учитывая, что компоненты скорости могут быть выражены по формулам

$$v_x = -\frac{K_n}{\mu} \frac{\partial h}{\partial x} \gamma, \quad v_y = -\frac{K_n}{\mu} \frac{\partial h}{\partial y} \gamma, \quad (280)$$

условие неразрывности может быть записано так:

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} = \frac{2 m \mu}{\gamma \cdot K_n} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}. \quad (281)$$

При установившемся движении $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$, и последнее уравнение примет вид:

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} = 0, \quad (282)$$

т. е. функция потенциала скорости Φ в данном случае заменяется величиной h^2 .

ФИКТИВНЫЙ ГРУНТ

Фиктивный грунт — грунт, все частицы которого имеют одинаковый диаметр d_e и скорость фильтрации через который равна скорости фильтрации через естественный грунт. Диаметр частиц такого грунта называется эффективным диаметром.

Эффективный диаметр может быть найден следующими способами.

1. **Способ Кинга.** Определяется суммарная поверхность всех частиц в 1 см^3 грунта, которая затем делится на число частиц и результат приравнивается поверхности частицы с эффективным диаметром:

$$d_e = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \frac{\sum n_i \pi d_i^2}{\sum n_i}}, \quad (283)$$

где

$$\sum n_i \pi d_i^2 = \frac{6(1-m)}{100} \sum \frac{\Delta g_i}{d_i};$$

Δg_i — доля каждой фракции в процентах по весу в 1 см^3 ;

d_i — средний диаметр частиц данной фракции;

n_i — число частиц данной фракции.

2. **Способ Газена.** За эффективный диаметр принимается диаметр отверстия такого сита, через которое просеивается 10% по весу испытуемого грунта.

3. **Способ Крюгера—Цункера.** Дается поверхность частиц фиктивного грунта, все частицы которого при той же порозности имеют одинаковый эффективный диаметр d_e :

$$\frac{6(1-m)}{100} \sum \frac{\Delta g_i}{d_i} = \frac{6(1-m)}{d_e},$$

откуда

$$\frac{100}{d_e} = \sum \frac{\Delta g_i}{d_i}, \quad (284)$$

где d_i — средний диаметр фракции (i).

4. **Способ Козени.** Эффективный диаметр определяется по формуле

$$\frac{100}{d_e} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\Delta g_1}{d_1} + \sum_{i=2}^{i=n} \frac{\Delta g_i}{d_i}. \quad (285)$$

Здесь:

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{d'_i} + \frac{2}{d'_i + d''_i} + \frac{1}{d''_i} \right),$$

где d'_i и d''_i — крайние диаметры данной фракции;

d_1 — верхний крайний диаметр фракции с диаметром менее 0,0025 мм;

Δg_1 — доля веса (в %) грунта, падающая на эту фракцию¹.

¹ В случае отсутствия малых фракций формула

(285) заменяется формулой $\frac{100}{d_e} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta g_i}{d_i}$, в ко-

торой d_i вычисляется таким же образом.

5. **Способ Замарина.** Эффективный диаметр определяется следующим образом:

$$\frac{1}{d_e} \sum_{i=1}^{i=n} A_i \cdot \ln \frac{d_i + 1}{d_i}. \quad (286)$$

Здесь $A_1, A_2, A_3 \dots$ представляют собой угловые коэффициенты (относительно оси d) последовательных прямых отрезков, из которых в действительности состоит весовая кривая.

Если весовая кривая начинается от нуля, то:

$$\frac{1}{d_e} \sum_{i=1}^{i=n} A_i \cdot \ln \frac{d_i + 1}{d_i} + \frac{3}{2} \frac{\Delta g_i}{d_i}.$$

Величина d_e , вычисленная по способу Замарина, больше, чем по Козени, но меньше, чем по Крюгеру.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ

Ниже приведены эмпирические формулы для определения коэффициента фильтрации K , полученные для фильтрации через песок.

Во всех формулах: d_e — в см, μ — в пузах, K — в см/сек, t — в °C.

1. **Формула Газена:**

$$K = c \frac{d_e^2}{\mu}, \quad (287)$$

где $c = 0,8$ для очень плотных песков;

$c = 1,55$ для песков средней порозности;

$c = 2,0$ для песков, составленных из округленных частиц почти одинакового диаметра;

d_e определяется по способу Газена.

Для воды:

$$K = 75 c d_e^2 \tau, \quad (288)$$

где $\tau = 0,7 + 0,03 t$ — температурный коэффициент.

2. **Формула Слехтера:**

$$K = 10,22 \frac{d_e^2}{\mu \sigma}, \quad (289)$$

где $\sigma = \frac{1-m}{n^2}$.

Для воды при 10° C: $\mu = 0,01333$ и

$$K = 766 \frac{d_e^2}{\sigma}.$$

3. **Формула Крюгера—Цункера:**

$$K = 0,5 \frac{d_e^2}{\mu \sigma}; \quad (290)$$

где

$$\sigma = \frac{(1-m)^2}{m};$$

d_e определяется по способу Крюгера—Цункера.

Для воды при 18° C:

$$K = 46,3 \frac{d_e^2}{\sigma}. \quad (291)$$

Для температуры t величину K надо умножить на μ при 18°C и разделить на μ при температуре t .

Формула пригодна при $d_e < 0,2 \text{ см}$.

4. Формула Козени:

$$K = 8,2 \frac{d_e^2}{\mu \sigma}, \quad (292)$$

где $\sigma = \frac{(1-m)^2}{m^3}$;

d_e определяется по способу Козени.

Для воды при 18°C :

$$K = 780 \frac{d_e^2}{\sigma}.$$

Переход к другим температурам аналогичен указанному в п. 3.

5. Формула Замарина для воды 18°C

$$K = 800 \frac{d^2 \alpha^2}{\sigma}, \quad (293)$$

где $\alpha = 1,275 - 1,5 m$, причём эффективный диаметр следует определить по способу Замарина.

Для других жидкостей:

$$K = 8,4 \frac{d^2 (1,275 - 1,5 m)^2}{\mu \cdot \sigma}$$

σ определяется по Козени.

Формула Терцаги (для глин и суглинков):

$$K = 0,556 \cdot 10^{-8} \tau \frac{(\epsilon - 0,15)^{11} (1 + \epsilon)}{(\epsilon - 0,15)^8 + \frac{0,0166}{\eta^2}}, \quad (294)$$

где $\tau = 0,70 + 0,03 t$ — температурный коэффициент;

$\epsilon = \frac{m}{1-m}$ — отношение объёма грунта к объёму, занимаемому зёрнами грунта;

$\eta = \frac{d_e}{0,00006}$ — эмпирический коэффициент;

d_e определяется по способу Газена.

При плавном изменяющемся движении грунтового потока гидравлический градиент для всего живого сечения будет величиной постоянной; следовательно, местные скорости во всех точках живого сечения в однородном грунте будут одинаковы:

$$v = -K \frac{dh}{dL} = \text{const.} \quad (295)$$

Вследствие этого при плавном изменяющемся движении скорость фильтрации в живом сечении будет равна местной скорости любой из точек живого сечения.

Формула (295) лежит в основе расчётов плавного изменяющегося движения грунтовых вод.

ПРИТОК ВОДЫ К КОЛОДЦАМ

При движении к колодцу плоского радиального потока артезианских вод в горизонтальном пласте небольшой толщины

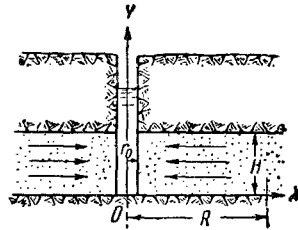
(фиг. 128) количество воды, притекающей внутрь колодца, равно:

$$Q = \frac{2\pi K H (H_R - H_0)}{\ln \frac{R}{r_0}}, \quad (295a)$$

где r_0 — радиус колодца (скважины);

H_0 — напор в колодце, равный высоте столба воды в нём;

H_R — напор воды на расстоянии R от колодца, где H_R практически не изменяется (R — радиус влияния).



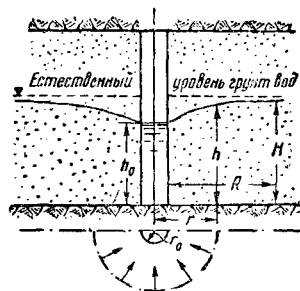
Фиг. 128

Распределение напора воды в пласте в зависимости от расстояния от колодца r определяется из уравнения:

$$h = \frac{Q}{2\pi K H} \ln \frac{r}{r_0} + H_0.$$

Распределение скоростей в подтекающей воде

$$v_r = -\frac{Q}{2\pi r H}.$$



Фиг. 129

Приток к колодцу безнапорных вод из горизонтального водоносного слоя (фиг. 129)

$$Q = \pi K \frac{H^2 - h_0^2}{\ln \frac{R}{r_0}}.$$

Понижение уровня воды (депресссионная кривая) в этом случае

$$h^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{r}{r_0} + h_0^2.$$

Если с помощью колодца не получают воду, а наоборот, сбрасывают её в водоносный слой, то в последних двух формулах знаки у H и h_0 необходимо переменить на обратные.

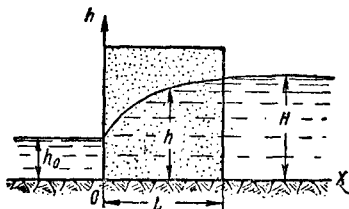
Если артезианская скважина питается из реки или канала или вода отводится с заболоченной местности с помощью дренажной трубы, то контуром питания будет прямая линия. В этих случаях можно пользоваться формулой (295), положив в ней $R=2l$, где l — расстояние от колодца до реки или от дренажной трубы до поверхности грунта.

При питании колодца безнапорными водами, поступающими из реки, дно которой служит продолжением горизонтального подстилающего слоя, можно пользоваться формулой для расчёта притока безнапорных вод, также положив в ней $R=2l$.

ФИЛЬТРАЦИЯ ЧЕРЕЗ ТЕЛО ПЕРЕМЫЧКИ

Выбрав оси координат OX и Oh так, как это показано на фиг. 130, уравнение (282) можно представить в виде:

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} = 0.$$



Фиг. 130

Отсюда (при $x=L$, $h=H$) уравнение кривой депрессии будет:

$$h^2 = h_0^2 + \frac{H^2 - h_0^2}{L} x. \quad (296)$$

Единичный расход притекающей воды

$$q = Kh \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{K}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x},$$

или согласно (296)

$$q = \frac{K (H^2 - h_0^2)}{2L}, \quad (297)$$

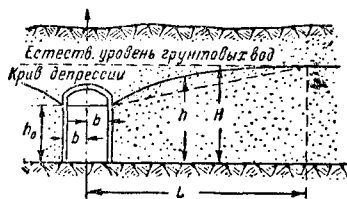
Внося значение q в уравнение (296), формулу кривой депрессии можно также представить в следующем виде:

$$h^2 - h_0^2 = \frac{2qx}{K}. \quad (298)$$

ВОДОСБОРНАЯ ГАЛЛЕРЕЯ

Формула (298) позволяет определить приток грунтовых вод к водосборной галлее.

Если горизонт воды в галлее h_0 (фиг. 131) и ось h помещена по середине сечения галлеи, ширина которой $2b$, то,



Фиг. 131

имея в виду, что по формуле преобразования координат $h = h'$ и $x' = x + b$, формулу (298) можно написать в следующем виде:

$$(h')^2 - h_0^2 = \frac{2q(x' - b)}{K}; \quad (299)$$

здесь q — односторонний приток к галлее, откуда при $x' = L$ и $h' = H$

$$q = \frac{K (H^2 - h_0^2)}{2(L - b)}, \quad (300)$$

где H — естественный уровень грунтовых вод над горизонтальным водонепроницаемым слоем.

АЭРО- И ГАЗОДИНАМИКА

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

Состояние газа определяется тремя его параметрами: давлением p , объемом V и абсолютной температурой T .

Уравнение, связывающее эти три определяющие параметра, называется уравнением состояния.

Для идеального газа таким уравнением является уравнение Клапейрона:

$$pV = GRT, \quad (301)$$

где G — количество газа в кг;

R — газовая постоянная в $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$;

V — объем газа в м^3 .

Так как удельный объем $v = \frac{V}{G}$, то

$$pv = RT. \quad (302)$$

Для реальных газов и паров нет универсальной теоретической формулы. Ниже при-

ведены наиболее употребительные эмпирические уравнения состояния реального газа:

$$1) p(v - b) = RT \text{ (уравнение Бернулли—Дюпре);} \quad (303)$$

$$2) \left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \text{ (уравнение Ван-дер-Ваальса);} \quad (304)$$

$$3) \left[p + \frac{a}{T(v + c)^2}\right](v - b) = RT \text{ (уравнение Клаузиуса),} \quad (305)$$

где a , b , c , R — коэффициенты, различные для различных газов и в общем случае непостоянные.

Для некоторых газов в табл. 81 приведены значения величин a и b в уравнении Ван-дер-Ваальса.

Таблица 81
Значение коэффициентов a и b в уравнении
Ван-дер-Ваальса

| Название газа | Химическая формула | a в ат (см ³ /моль) ² | b в см ³ /моль |
|--------------------|-----------------------|--|-----------------------------|
| Азот | N ₂ | 1,31 · 10 ⁶ | 37,3 |
| Водород | H ₂ | 0,19 · 10 ⁶ | 23,0 |
| Водяной пар . . . | H ₂ O | 5,87 · 10 ⁶ | 33,2 |
| Кислород | O ₂ | 13,61 · 10 ⁶ | 31,6 |
| Углекислота . . . | CO ₂ | 3,61 · 10 ⁶ | 42,8 |

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ СТАТИКИ ТЯЖЕЛОГО ГАЗА

Распределение давления в тяжелом газе определяется законом:

$$\frac{dp}{dz} = -\gamma, \quad (306)$$

т. е. падение давления по вертикали при равновесии тяжелого газа равно удельному весу с обратным знаком.

Полагая известной зависимость между p и γ в виде

$$p = p_0 \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^m,$$

где p_0 и γ_0 — значения давления и удельного веса при $z = 0$,

m — показатель политропы,

уравнение (306) можно записать в виде:

$$\frac{dp}{\gamma} = \frac{p_0}{\gamma_0} p^{-\frac{1}{m}} dp = -dz,$$

откуда при $m \neq 1$

$$\frac{m}{m-1} \frac{p_0}{\gamma_0} \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] = -z; \quad (307)$$

при $m = 1$ (изотермический случай)

$$\frac{p_0}{\gamma_0} \ln \frac{p}{p_0} = -z; \quad (308)$$

или иначе:

при $m = 1$

$$p = p_0 e^{-\frac{z}{RT_0}}$$

при $m \neq 1$,

$$p = p_0 \left(1 - \frac{m-1}{m} \cdot \frac{z}{RT_0} \right)^{\frac{m}{m-1}}$$

Барометрическая формула. Барометрическое (свободное) давление воздуха над уровнем моря в среднем равно 760 мм рт. ст. и может колебаться в зависимости от метеорологических условий в пределах $\pm 5\%$.

Если $h_2 - h_1$ — разность высот двух точек в км, p_2 и p_1 — соответствующие давления

воздуха и t_m — средняя температура столба воздуха между этими точками, то, пренебрегая влажностью воздуха, можно пользоваться формулой

$$h_2 - h_1 = (18,4 + 0,067 t_m) \lg \frac{p_1}{p_2}. \quad (309)$$

Стандартная атмосфера. В воздухоплавании и авиации принята так называемая стандартная атмосфера, дающая определенный закон изменения основных метеорологических элементов с высотой.

Исходные данные стандартной атмосферы:

$$p_0 = 10\,332 \text{ кг/м}^2; \quad t_0 = 15^\circ \text{С} \quad (T_0 = 288^\circ \text{К});$$

$$\gamma_0 = 1,226 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_0 = 0,125 \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}^4}.$$

Падение температуры до высоты 11 000 м, 6,5° на каждые 1 000 м.

Давление и плотность атмосферы до высоты 11 000 м вычисляются по формулам:

$$\frac{p}{p_0} = \left(1 - \frac{h}{44\,300} \right)^{5,256}; \quad (310)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{h}{44\,300} \right)^{4,256}. \quad (311)$$

Выше 11 000 м отношение соответствующих давлений и плотностей определяется формулой:

$$\frac{p}{p_{11}} = \frac{\rho}{\rho_{11}} = e^{-\left(\frac{h-11\,000}{6\,340} \right)}. \quad (312)$$

Значения стандартной атмосферы для высот до 15 000 м приведены в табл. 82.

Таблица 82
Стандартная атмосфера

| Высота в м | $\frac{p}{p_0}$ | $\frac{p}{\text{мм рт. ст.}}$ | t° | γ в кг/м ³ | ρ/ρ_0 |
|---------------|-----------------|-------------------------------|-----------|------------------------------|---------------|
| 0 | 1,0000 | 760,0 | +15,0 | 1,2250 | 1,0000 |
| 1 000 | 0,8870 | 674,1 | + 8,5 | 1,1120 | 0,9074 |
| 1 200 | 0,8656 | 657,9 | + 7,2 | 1,0903 | 0,8897 |
| 1 400 | 0,8443 | 642,0 | + 5,9 | 1,0690 | 0,8723 |
| 1 500 | 0,8345 | 634,2 | + 5,3 | 1,0584 | 0,8637 |
| 1 600 | 0,8243 | 626,4 | + 4,6 | 1,0480 | 0,8551 |
| 1 800 | 0,8042 | 611,2 | + 3,3 | 1,0272 | 0,8382 |
| 2 000 | 0,7845 | 596,2 | + 2,0 | 1,0065 | 0,8216 |
| 2 200 | 0,7652 | 581,6 | + 0,7 | 0,9863 | 0,8052 |
| 2 300 | 0,7463 | 567,2 | — 0,6 | 0,9670 | 0,7891 |
| 2 500 | 0,7270 | 552,1 | — 1,3 | 0,9472 | 0,7731 |
| 2 600 | 0,7273 | 552,1 | — 1,3 | 0,9475 | 0,7732 |
| 2 800 | 0,7097 | 539,3 | — 3,2 | 0,9243 | 0,7575 |
| 3 000 | 0,6918 | 525,8 | — 4,5 | 0,9004 | 0,7420 |
| 3 500 | 0,6490 | 493,2 | — 7,8 | 0,8634 | 0,7046 |
| 4 000 | 0,6082 | 462,3 | —11,0 | 0,8193 | 0,6686 |
| 4 500 | 0,5696 | 432,9 | —14,3 | 0,7770 | 0,6340 |
| 5 000 | 0,5030 | 405,1 | —17,5 | 0,7363 | 0,6008 |
| 5 500 | 0,4983 | 378,7 | —20,3 | 0,6972 | 0,5689 |
| 6 000 | 0,4655 | 353,8 | —24,0 | 0,6593 | 0,5384 |
| 6 500 | 0,4344 | 330,2 | —27,3 | 0,6240 | 0,5091 |
| 7 000 | 0,4051 | 307,3 | —30,5 | 0,5896 | 0,4810 |
| 7 500 | 0,3773 | 286,8 | —33,8 | 0,5567 | 0,4542 |
| 8 000 | 0,3512 | 266,9 | —37,0 | 0,5252 | 0,4285 |
| 9 000 | 0,3032 | 230,5 | —43,5 | 0,4661 | 0,3806 |
| 10 000 | 0,2506 | 198,2 | —50,0 | 0,4127 | 0,3667 |
| 11 000 | 0,2229 | 169,4 | —56,5 | 0,3636 | 0,2967 |
| 12 000 | 0,1983 | 144,6 | —56,5 | 0,3104 | 0,2553 |
| 13 000 | 0,1627 | 123,7 | —56,5 | 0,2653 | 0,2165 |
| 14 000 | 0,1339 | 105,6 | —56,5 | 0,2266 | 0,1849 |
| 15 000 | 0,1186 | 90,1 | —56,5 | 0,1935 | 0,1579 |

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ ПО ТРУБАМ

Основные уравнения. При движении газа по трубам помимо гидравлических явлений будут иметь место и тепловые изменения состояния газа. Для того чтобы учесть в уравнении Бернулли тепловую энергию, необходимо знать уравнение физического состояния газа, т. е. должна быть известна функция $p = f(\gamma)$.

Если пренебречь поправками на усреднение, что допустимо сделать для большинства практических случаев, то движение газа на элементарно малом участке трубы dx с плавно изменяющимся сечением будет определяться следующими четырьмя уравнениями.

$$\left. \begin{aligned} \text{I. Уравнение движения:} \\ d\left(\frac{c^2}{2g}\right) + \frac{dp}{\gamma} + dh + \lambda \frac{dx}{D} \frac{c^2}{2g} = 0. \\ \text{II. Уравнение расхода:} \\ Q_g = \gamma \cdot c \cdot F = \frac{cF}{v}. \\ \text{III. Уравнение теплового баланса:} \\ dq = di + Ad\left(\frac{c^2}{2g}\right) + Adh. \\ \text{IV. Уравнение состояния:} \\ p(v-b) = RT, \end{aligned} \right\} (313)$$

где c — скорость газа;

Q_g — весовой расход;

i — энтальпия.

Уравнения III и IV определяют зависимость

$$p = f(\gamma).$$

Общие уравнения движения газа по трубе постоянного кругового сечения с прямой осью. Так как сечение трубы постоянно, т. е. $dF = 0$, и ось трубы прямая, т. е. геометрический напор может быть выражен через длину трубы $h = \sin \alpha \cdot x$ (α — угол наклона трубы к горизонту), то на основании уравнений (313)

$$\frac{1}{c} \frac{dc}{dx} = \frac{\frac{\lambda}{2D} c^2 + g \sin \alpha}{(a^*)^2 - c^2}, \quad (314)$$

где $a^* = \sqrt{g \frac{dp}{d\gamma}}$ — скорость распространения звука в газе (критическая скорость).

Интегрируя уравнение (314), получим:

$$x - x_0 = \int_{c_0}^c \frac{(a^*)^2 - c^2}{\frac{\lambda}{2D} c^2 + g \sin \alpha} \cdot \frac{dc}{c}. \quad (315)$$

Уравнение состояния, физического процесса и сплошности ($\gamma c = \text{const}$) позволяют выразить λ и a^* через скорость c .

Изотермическое движение. В этом случае $\lambda = \text{const}$, ибо в общем случае установившегося движения газа по трубе постоянного сечения λ зависит только от температуры.

Критическая скорость:

$$a^* = \sqrt{g \frac{dp}{d\gamma}} = \frac{\sqrt{gRT}}{1 - b\gamma} = c \frac{\sqrt{gRT}}{c - bs},$$

где $s = \frac{Q_g}{F}$.

Тогда интеграл уравнения (315) даёт x как функцию c :

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{2D} (x - x_0) = & \frac{A}{2} \ln \frac{c^2 + 2 \frac{Dg}{\lambda} \sin \alpha}{c_0^2 + 2 \frac{Dg}{\lambda} \sin \alpha} + \\ & + \sqrt{\frac{B}{2 \frac{Dg}{\lambda} \sin \alpha}} \left[\arctg \frac{c}{\sqrt{2 \frac{Dg}{\lambda} \sin \alpha}} - \right. \\ & \left. - \arctg \frac{c_0}{\sqrt{2 \frac{Dg}{\lambda} \sin \alpha}} \right] - \frac{C}{c - bs} + \\ & + \frac{C}{c_0 - bs} + C_1 \ln \frac{c - bs}{c_0 - bs}, \quad (316) \end{aligned}$$

где A , B , C и C_1 — постоянные, зависящие от параметров, определяющих движение газа:

$$A = \frac{gRT \left(b^2 s^2 - 2 \frac{Dg}{\lambda} \sin \alpha \right)}{\left(b^2 s^2 + 2 \frac{Dg}{\lambda} \sin \alpha \right)^2} - 1;$$

$$B = - \frac{2 \frac{Dg}{\lambda} gRT bs \sin \alpha}{\left(b^2 s^2 + 2 \frac{Dg}{\lambda} \sin \alpha \right)^2};$$

$$C = \frac{gRT bs}{b^2 s^2 + 2 \frac{Dg}{\lambda} \sin \alpha};$$

$$C_1 = \frac{gRT \left(b^2 s^2 - 2 \frac{Dg}{\lambda} \sin \alpha \right)}{\left(b^2 s^2 + 2 \frac{Dg}{\lambda} \sin \alpha \right)^2}.$$

Для горизонтального трубопровода ($\alpha = 0$) уравнение (316) упростится:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{2D} (x - x_0) = & - \ln \frac{c}{c_0} + \frac{gRT}{(bs)^2} \left(\ln \frac{c}{c_0} - \right. \\ & \left. - \frac{bs}{c - bs} + \frac{bs}{c_0 - bs} - \ln \frac{c - bs}{c_0 - bs} \right). \quad (317) \end{aligned}$$

Изохорическое движение. Уравнение физического процесса будет:

$$dv = 0, v = \text{const} \text{ или } \gamma = \text{const}.$$

Уравнение сплошности даёт $dc = 0$, т. е. скорость по трубе постоянна.

Для интервала температур $(-40) \div (+120)^\circ\text{C}$ λ можно считать постоянным.

Интеграл уравнения (315) даёт:

$$\frac{p - p_0}{\gamma} + (x - x_0) \sin \alpha + \frac{\lambda (x - x_0) c^2}{D} = 0. \quad (318)$$

Если за уравнение состояния принять уравнение Бернулли—Дюпре, то для dq имеет место равенство:

$$dq = \left(c_v \frac{v-b}{R} + Av \right) dp + A \sin \alpha \cdot dx.$$

Принимая теплоёмкость $c_v = \text{const}$, для горизонтального трубопровода

$$q = \left(c_v \frac{v-b}{R} + Av \right) (p - p_0). \quad (319)$$

Изобарическое движение. Для случаев, когда можно считать, что $dp = 0$, т. е. $p =$

$$= \text{const}, a^* = \sqrt{g \frac{dp}{d\gamma}} = 0, \text{ уравнение (314)}$$

примет вид:

$$\frac{1}{c} \frac{dc}{dx} = - \left(\frac{\lambda}{2D} + \frac{g \sin \alpha}{c^2} \right).$$

Для горизонтальных ($\alpha = 0$), коротких трубопроводов последнее уравнение даёт:

$$\frac{1}{c} \frac{dc}{dx} = - \frac{\lambda}{2D}.$$

Интегрируя, получим:

$$c = c_0 e^{-\frac{\lambda x}{2D}}, \quad (320)$$

т. е. скорость газа быстро убывает.

Уравнение количества тепла даёт

$$dq = \left(c_v \frac{p}{R} + Ap \right) dv + A d \left(\frac{c^2}{2g} \right).$$

При $c_v = \text{const}$

$$q = \left(c_v \frac{p}{R} + Ap \right) \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\gamma_0} \right) + A \frac{c^2 - c_0^2}{2g}. \quad (321)$$

Движение при полной тепловой изоляции трубопровода от внешнего пространства. Для данного случая будет иметь место следующая система уравнений:

$$\frac{c^2}{g} \frac{dc}{c} + \frac{\gamma}{A} \frac{\partial i}{\partial p} \frac{dp}{\gamma} + \frac{\gamma}{A} \frac{\partial i}{\partial \gamma} \frac{d\gamma}{\gamma} = - \sin \alpha dx;$$

$$\frac{c^2}{g} \frac{dc}{c} + \frac{dp}{\gamma} = - \frac{\lambda}{D} \frac{c^2}{2g} dx - \sin \alpha \cdot dx;$$

$$\frac{dc}{c} + \frac{d\gamma}{\gamma} = 0.$$

Решая систему относительно дифференциалов $\frac{dc}{c}$, $\frac{d\gamma}{\gamma}$, $\frac{dp}{\gamma}$ (принимая, что состояние газа определяется уравнением Бернулли—Дюпре), будем иметь:

$$\frac{dc}{c} = -g \left[\frac{(k-\gamma b) \lambda \frac{1}{D} \frac{c^2}{2g}}{(1-\gamma b)(c^2-a^2)} + \frac{\sin \alpha}{c^2-a^2} \right] dx;$$

$$\frac{dp}{\gamma} = \frac{a^2}{c^2-a^2} \left(\frac{\lambda}{D} \frac{c^2}{2g} + \sin \alpha \right) dx + \frac{(k-1) c^2 \frac{\lambda}{D} \frac{c^2}{2g} dx}{(1-\gamma b)(c^2-a^2)};$$

$$\frac{d\gamma}{\gamma} = g \left[\frac{(k-\gamma b) \frac{\lambda}{D} \frac{c^2}{2g}}{(1-\gamma b)(c^2-a^2)} + \frac{\sin \alpha}{c^2-a^2} \right] dx,$$

$$\text{где } a^2 = gkRT \left(1 + \frac{bp}{RT} \right)^2;$$

k — показатель адиабаты.

Уравнение теплового баланса для этого случая

$$d \left(i + A \frac{c^2}{2g} + Ax \sin \alpha \right) = 0$$

или

$$i + A \frac{c^2}{2g} + Ax \sin \alpha = i_0 + A \frac{c_0^2}{2g} + Ax_0 \sin \alpha = AB^*$$

позволяет выразить a^2 как функцию c :

$$a^2 = \frac{(k-1) kc^2}{2(ck-bs)(c-bs)} [2gB^* - c^2 - 2gx \sin \alpha].$$

Заменяв a^2 в уравнении для $\frac{dc}{c}$ согласно последнему равенству и интегрируя его для случая горизонтального трубопровода, получим:

$$\frac{\lambda}{2D} (x-x_0) = \frac{A}{k(c_0k-bs)} - \frac{A}{k(ck-bs)} + \frac{B}{k} \ln \frac{ck-bs}{c_0k-bs} + C \ln \frac{c}{c_0}, \quad (322)$$

где

$$A = \frac{bs}{2} \left[2k-1 + g \frac{(k-1) k^2}{b^2 s^2} B^* \right];$$

$$B = -\frac{1}{2} \left[1 + g \frac{(k-1) k^2}{b^2 s^2} B^* \right];$$

$$C = -\frac{1}{2} \left[1 - g \frac{(k-1) k}{b^2 s^2} B^* \right].$$

ПРАКТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ ПО ТРУБАМ

Формула Мейера для ламинарного режима. Весовой расход газа или пара равен

$$G = \frac{\pi d^4 p_1 \Delta m}{128 \mu l (1+m) R_0 T_1} \left[p_1 - p_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1+\frac{1}{m}} \right], \quad (323)$$

где m — показатель политропы;

Δ — отношение удельного веса газа к удельному весу воздуха при одинаковых температурах и давлениях;

R_0 — газовая постоянная воздуха;

T_1 — температура газа в начале трубопровода.

Формулы Веймаута для турбулентного режима. Весовой расход

$$G = C \sqrt{\frac{d^{5/2} \cdot p_1 \cdot \Delta \cdot m}{l (1+m) T_1}} \times \sqrt{\frac{1}{p_1 - p_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1 + \frac{1}{m}}}}, \quad (324)$$

где

$$C = \sqrt{\frac{g \pi^2}{8 \cdot 0,009407 R_0}} = 6,64$$

в технической системе единиц.

Для изотермического потока ($m = 1$)

$$G = 4,69 \cdot d^{1/2} \sqrt{\frac{\Delta (p_1^2 - p_2^2)}{l T_1}}. \quad (325)$$

При скорости движения газов, близкой к скорости звука, весовой расход

$$G = \sqrt{\frac{g \cdot \pi^2 d^{5/2} \cdot p_1 \cdot m \cdot \Delta}{8 \cdot 0,009407 R_0 T_1}} \times \sqrt{\frac{\left[p_1 - p_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1 + \frac{1}{m}} \right]}{(1+m) \left[l + \frac{2d}{m \lambda} \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \right]}}. \quad (326)$$

Для случая турбулентного изотермического потока при незначительном перепаде давления вдоль газопровода $p_1 - p_2$ формула (326) принимает простой вид:

$$G = 6,64 d^{1/2} \sqrt{\frac{\Delta p H}{l T_1}}, \quad (327)$$

где $p = \frac{p_1 + p_2}{2}$ — среднее абсолютное давление в газопроводе;

$H = p_1 - p_2$ — разность давлений в начале и конце трубопровода.

Формула (327) применима, если величина $(p_1 - p_2)$ составляет не более 10% величины среднего давления p в газопроводе.

Формула Христиановича С. А., Требина Ф. А., Черникова В. И. (изотермический режим)

$$G = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \left[1 + \frac{k}{3} \left(p_1 + \frac{p_2^2}{p_1 + p_2} \right) \right] \sqrt{\frac{d^5 (p_1^2 - p_2^2)}{l T_1}}, \quad (328)$$

где R — газовая постоянная;

λ — коэффициент гидравлического сопротивления;

k — коэффициент, учитывающий отклонение газа от закона Клапейрона:

$$p = \frac{\gamma}{1 + k p} R T.$$

ДВИЖЕНИЕ СМЕСИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА ПО ТРУБАМ

Удельный вес смеси и уравнение её состояния. Если на 1 кг жидкости приходится η кг газа, то удельный вес смеси θ равен

$$\theta = \frac{1 + \eta}{\frac{1}{\gamma_{жидк}} + \frac{\eta}{\gamma_{газ}}}. \quad (329)$$

Уравнение состояния газового компонента в общем случае политропического процесса определяется уравнением политропы:

$$\gamma_{газ} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{m}} \gamma'_{газ}. \quad (330)$$

Из уравнений (329) и (330) следует:

$$\theta = \frac{1 + \eta}{\frac{1}{\gamma_{жидк}} + \frac{\eta}{\gamma_{газ}} \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{m}}}, \quad (331)$$

где $\gamma'_{газ}$ и p_1 — удельный вес газа и давление в начале газопровода.

Движение смеси по горизонтальному трубопроводу при изотермическом режиме. Этот случай наиболее часто отвечает действительным условиям, ибо большая теплоёмкость жидкого компонента и большой коэффициент теплопередачи обуславливают неизменную температуру газа, близкую к температуре жидкости.

Весовой расход

$$G = \sqrt{\frac{p_1 - p_2 + a \ln \frac{p_1 + a}{p_2 + a}}{l}} \times \sqrt{\frac{\pi^2 g d^5 (1 + \eta) \gamma_{жидк}}{64 k}}, \quad (332)$$

где

$$a = \frac{\gamma_{жидк} \eta p_1}{\gamma'_{газ}} = \frac{\gamma_{жидк} \eta R_0 T_1}{\Delta};$$

$k = \frac{\lambda}{8}$ — коэффициент сопротивления, определяемый из опытов.

Приближённая формула для случая движения смеси жидкости и газа по горизонтальному трубопроводу при политропическом процессе. Весовой расход

$$G = \sqrt{\frac{\pi^2 g d^5 (1+\gamma) m \Delta p_1^2}{64 \gamma l R_0 T_1 (1+m)} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1+m}{m}} \right]}. \quad (333)$$

Для изотермического процесса

$$G = \sqrt{\frac{\pi^2 d^5 g (1+\gamma) \Delta}{128 k \gamma l T_1 R_0} (p_1^2 - p_2^2)}, \quad (334)$$

или, упрощая,

$$G = C \cdot \sqrt{\frac{d^5 g (1+\gamma) \Delta}{k \gamma l T_1} (p_1^2 - p_2^2)}, \quad (335)$$

где

$$C = \frac{\pi}{16} \sqrt{\frac{2}{29,27}} \approx 0,051.$$

Движение смеси жидкости и газа по вертикальной трубе при изотермическом режиме (эрлифт). Весовой расход

$$G = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot g \cdot d^5 (1+\gamma) b (p_2^2 e^{2bl} - p_1^2) \Delta}{64 k \gamma R_0 T_1 (1 - e^{2bl})}}, \quad (336)$$

где

$$b = \frac{1+\gamma}{\gamma} \frac{\gamma'_{газа}}{p_1} = \frac{(1+\gamma) \Delta}{\gamma R_0 T_1}.$$

Формула не учитывает эффекта проскальзывания газового компонента смеси относительно увлекаемой им жидкости.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Александров В. Л. Техническая гидромеханика, М.—Л., ГТИ, 1946, 431 с.
2. Бахметьев Б. А. Гидравлика открытых русел, 1934 г.
3. Белоконов Н. И. Транспортное машиностроение. № 10, 1937 г.
4. Гидравлика. Под ред. И. И. Агроскина. М.—Л., Госэнергоиздат, 1944, 332 с.
5. Гурвич Д. Л. и Френкель Н. З. Гидравлика, изд. 2. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940, 355 с.
6. Евреинов В. Н. Гидравлика, изд. 4, Л.—М., Речиздат, 1947, 740 с.
7. Жуковский Н. Е. Полное собрание сочинений, М. 1937.
8. Кочин Н. Е. и Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика, ч. I и II, М.—Л., Гостехиздат, 1948, 150 с.
9. Лейбензон Л. С. и др. Гидравлика, М.—Л.—Н., ГНТИ, 1934 г. 369 с.
10. Маккавеев В. М. и Коновалов И. М. Гидравлика. Л.—М., Речиздат, 1940, 642 с.
11. Малышко В. М. Гидравлика и основы гидромеханики. Л., 1940, 301 с.
12. Павловский Н. Е. Гидравлический справочник. М., 1937.
13. Сборник физических констант. М.—Л., ОНТИ, 1937, 658 с.
14. Страхович К. И. Прикладная газодинамика, М.—Л., ОНТИ, 1937, 300 с.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

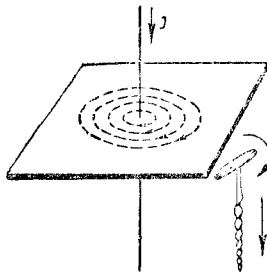


МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитным полем называется физическое пространство, состояние и свойства которого неразрывно связаны с движением электрических зарядов. За направление магнитного поля в рассматриваемой точке пространства принимают направление, в котором устанавливается свободно подвешенная магнитная стрелка.

Магнитная индукция (B) характеризует величину и направление магнитного поля и может быть определена:

а) по механической силе, с которой магнитное поле действует на движущиеся в нём электрические заряды;



Фиг. 1. Направление силовых линий от прямолинейного проводника с током

б) по э. д. с., наводимой в проводнике, движущемся в магнитном поле.

Индукция магнитного поля зависит от физических свойств среды, от величины и расположения электрических токов, создающих магнитное поле. Опыт показывает, что в однородной среде вокруг прямолинейного проводника с током образуется круговое магнитное поле, направление которого определяется правилом буравчика (фиг. 1).

По закону Био и Савара, магнитная индукция в любой точке поля однородной среды определяется:

$$dB = K \frac{Idl}{r^2} \sin \alpha, \quad (1)$$

где Idl — элемент тока;

r — расстояние от элемента тока до той точки поля, где определяется магнитная индукция;

α — угол между элементом тока и лучом, соединяющим элемент тока

с той точкой поля, где определяется индукция;

K — коэффициент пропорциональности, зависящий от физических свойств среды, в которой образуется магнитное поле, и от выбора единиц измерения магнитной индукции, тока и длины.

В рационализированной практической системе единиц «вольт — ампер — сантиметр — секунда» за единицу магнитной индукции принимают

$$\frac{\text{вольт-секунда}}{\text{см}^2} \left[\frac{\text{в-с}}{\text{см}^2} \right] \text{ или } \frac{\text{вебер}}{\text{см}^2} \left[\frac{\text{вб}}{\text{см}^2} \right],$$

равную 10^8 абсолютных электромагнитных единиц магнитной индукции.

Абсолютная электромагнитная единица магнитной индукции называется гаусс ($гс$);

$$1 \frac{\text{вб}}{\text{см}^2} = 10^8 \text{ гс}.$$

В этой системе единиц закон Био и Савара выражается формулой

$$dB = \mu \cdot \frac{Idl}{4\pi r^2} \sin \alpha. \quad (2)$$

Магнитная индукция, подсчитанная по этой формуле, а также по формулам, приводимым ниже, выражается в $\frac{\text{вб}}{\text{см}^2}$.

Формула (2) применима для однородной среды.

Здесь

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (3)$$

где μ — магнитная проницаемость данной среды;

μ_r — относительная магнитная проницаемость среды (находится экспериментально); для вакуума $\mu_r = 1$;

μ_0 — магнитная проницаемость вакуума:

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8} \approx 0,4\pi 10^{-8} \frac{\text{вб}}{\text{см}^2}. \quad (4)$$

Все физические тела в отношении магнитной проницаемости могут быть разделены на две группы: слабомагнитные тела и сильномагнитные тела. Относительная магнитная проницаемость первых весьма близка к единице; при этом тела, у которых $\mu_r < 1$, на-

зываются диамагнитными, а те, у которых $\mu_r > 1$, — парамагнитными.

К сильномагнитным телам относятся те, магнитная проницаемость которых значительно превосходит единицу. Эти тела носят название ферромагнитных, так как к ним принадлежат сталь, кобальт и никель, а также некоторые сплавы.

Величина магнитной индукции (B) определяется в зависимости от величины и распределения тока.

а) От прямолинейного бесконечно длинного проводника (фиг. 2):

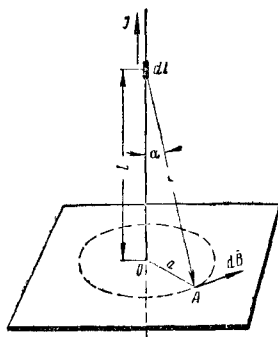
$$B = \int dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \sin \alpha \frac{dl}{r^2}; \quad (5)$$

из фиг. 2 видно, что

$$l = a \operatorname{ctg} \alpha; \quad a = r \sin \alpha;$$

поэтому

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\pi}^0 -\frac{1}{a} \sin \alpha \cdot d\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}. \quad (6)$$



Фиг. 2. Магнитная индукция от прямолинейного проводника

б) От прямолинейного проводника конечной длины:

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\pi-\alpha_2}^{\alpha_1} \frac{dl}{r^2} \sin \alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\sin \beta_1 + \sin \beta_2), \quad (7)$$

где a — расстояние точки A , в которой определяется индукция, от проводника с током;

β_1 и β_2 — углы, образуемые перпендикуляром к проводнику с током из точки A , в которой определяется индукция, и лучами, соединяющими концы проводников с точкой A .

в) Вдоль центральной оси кругового тока, т. е. проводника, имеющего форму окружности (витка) (фиг. 3):

$$B = \int dB' = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi R} \frac{dl}{r^2} \sin \beta = \frac{\mu_0 I}{2R} \sin^3 \beta, \quad (8)$$

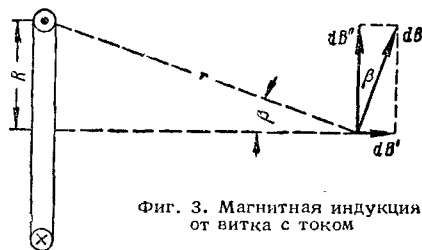
где R — радиус витка;

β — угол между осью и лучом, соединяющим точку, в которой определяется индукция, с витком;

все dB' на фиг. 3 в результате геометрического сложения равняются нулю.

г) В центре кругового тока (витка) величина индукции получается как частный случай индукции вдоль центральной оси, полагая $\beta = 90^\circ$:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (9)$$



Фиг. 3. Магнитная индукция от витка с током

д) Вдоль центральной оси цилиндрической катушки (фиг. 4):

$$B = \int dB = \int_0^l \mu_0 \frac{Iw}{2l} \frac{\sin^3 \beta}{a} dx = \mu_0 \frac{Iw}{2l} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2), \quad (10)$$

где w — число витков катушки;

a — радиус витка в см;

l — длина катушки в см;

β_1 и β_2 — углы между центральной осью катушки и лучами, соединяющими точку, в которой определяется индукция, с конечными витками катушки, указанными на фиг. 4.

В случае бесконечно длинной катушки магнитная индукция в середине катушки будет

$$B = \mu_0 \frac{Iw}{l}, \quad (11)$$

Так как $\beta_1 = 0^\circ$, $\beta_2 = 90^\circ$.

На краю бесконечно длинной катушки магнитная индукция будет равна

$$B = \mu_0 \frac{Iw}{2l}. \quad (12)$$

Для одного края катушки

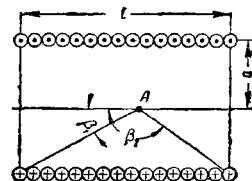
$$\beta_1 = 0^\circ, \beta_2 = 90^\circ.$$

Для другого края катушки

$$\beta_1 = 90^\circ, \beta_2 = 180^\circ.$$

В середине катушки конечной длины

$$\cos \beta_1 = -\cos \beta_2 = \frac{\frac{1}{2}l}{\sqrt{\frac{l^2}{4} + a^2}}.$$



Фиг. 4. Магнитная индукция от катушки с током

Магнитная индукция в середине катушки конечной длины

$$B = \mu_0 \frac{I w}{\sqrt{l^2 - 4a^2}}. \quad (13)$$

Напряжённость магнитного поля (H) представляет отношение магнитной индукции к магнитной проницаемости среды в данной точке:

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu}. \quad (14)$$

Напряжённость есть вектор, совпадающий в однородной среде с вектором B .

Единица напряжённости магнитного поля в практической рационализированной системе единиц имеет размерность $\frac{a}{cm}$;

$$1 \frac{a}{cm} = 1,256 \text{ эрстед (э);}$$

$$1 \text{ э} = 0,795 \frac{a}{cm} \approx 0,8 \frac{a}{cm};$$

где эрстед — единица напряжённости магнитного поля в абсолютной электромагнитной системе

$$H = \frac{B}{\mu_r} \text{ э}, \quad (15)$$

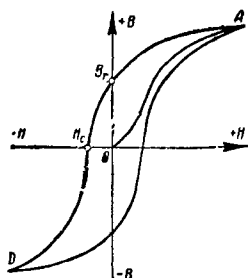
если B выражено в гс.

Магнитный поток (Φ) представляет сумму произведений магнитной индукции B на элементы площадок dS , на которые может быть разбита заданная поверхность:

$$\Phi = \int_S \bar{B} d\bar{S} = \int_S B dS \cos(\bar{B}, d\bar{S}).$$

Магнитный поток измеряется в вольт-секундах. 1 в-с называется вебером. В абсолютной электромагнитной системе единиц магнитный поток измеряется в максвеллах:

$$1 \text{ вб} = 10^8 \text{ мкс.}$$



Фиг. 5. Петля гистерезиса

Ферромагнетизм.

Магнитная проницаемость слабомагнитных тел может считаться величиной постоянной. Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов меняется с изменением индукции и даже для одного и того же значения индукции может быть различна в зависимости от предыдущего магнитного состояния. Для характеристики ферромагнитных материалов обычно пользуются основной кривой намагничивания, которая представляет зависимость $B = f_1(H)$, полученную для ненамагниченного предварительно материала.

Имея основную кривую намагничивания OA (фиг. 5), можно легко найти зависимость $\mu = f_2(B)$ и $\mu = f_3(H)$. Исследование зависимости $\mu = f_3(H)$ показывает, что по мере

увеличения напряжённости магнитного поля магнитная проницаемость сначала возрастает, а затем начинает уменьшаться, стремясь в пределе при $H = \infty$ к единице. Состояние, при котором дальнейшее увеличение напряжённости магнитного поля не повышает значительно значение магнитной индукции, называется магнитным насыщением.

Гистерезис. Весьма важной характеристикой ферромагнитных тел является зависимость $B = f(H)$ при циклическом изменении напряжённости магнитного поля от $+H_{\max}$ до равной по абсолютной величине и противоположной по знаку $H_{\min} = -H_{\max}$ и затем снова до $+H_{\max}$ (фиг. 5). График этой зависимости показывает запаздывание изменения магнитной индукции от изменения напряжённости магнитного поля. Это явление носит название магнитного гистерезиса, а график изменения $B = f_1(H)$ — петли гистерезиса. При напряжённости поля $H = 0$ магнитная индукция имеет определённое значение $B = B_r$ и называется остаточной индукцией. Для доведения индукции до нуля необходимо создать напряжённость магнитного поля $H = H_c$, называемую коэрцитивной силой.

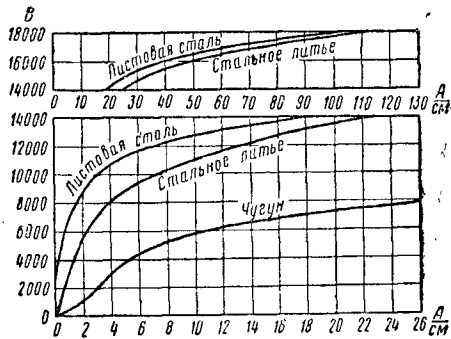
Магнитные свойства ферромагнитных материалов. Совершенно чистое электролитическое железо, свободное от всяких примесей, при температуре до 80°C обладает высокими магнитными качествами. Примеси в железе изменяют магнитные свойства. Примеси, которые не образуют химических соединений с железом, занимают лишний объём, вследствие чего магнитные свойства снижаются. Если примеси образуют с железом химические соединения, к тому же растворяются в железе, то это приводит к резким изменениям магнитных свойств железа. Сталь, содержащая более 0,9% углерода, при быстром охлаждении приобретает большую магнитную стойкость: трудно намагничивается и трудно размагничивается. Примеси к стали марганца ухудшают магнитные свойства, снижая остаточный магнетизм и увеличивая коэрцитивную силу. Присутствие в стали примесей кремния (в пределах 4—5%) значительно увеличивает магнитную проницаемость и снижает коэрцитивную силу. При длительных нагревах стали отмечается явление старения, в результате которого для достижения той же самой магнитной индукции требуется большая намагничивающая сила, при этом весьма сильно увеличивается коэрцитивная сила. Примеси кремния к стали в значительной мере устраняют явление старения. В сплаве железа с никелем удаётся путём соответственного подбора соотношения железа и никеля (хотя никель и обладает более низкими магнитными свойствами, чем сталь) получить материал с необычайно высокими магнитными качествами. Сплав из 21,5% железа и 78,5% никеля, называемый пермалоем, обладает относительной магнитной проницаемостью $\mu_r = 90\,000$.

Для большей устойчивости магнитных свойств в практике применяется пермалойт

с содержанием 50% железа и 50% никеля, но в этом случае значение магнитной проницаемости снижается до 12 000. Пермаллой применяется главным образом в технике слабых токов, где мы имеем дело со слабыми магнитными полями. Для изготовления постоянных магнитов применяются специальные стали с примесью кобальта хрома, вольфрама и никеля, которые при большой остаточной индукции обеспечивают большую коэрцитивную силу.

На фиг. 6 приведены кривые намагничивания для материалов, применяемых в машиностроении и аппаратостроении.

Расчёт магнитной цепи. Линейный интеграл напряжённости магнитного поля по замкнутой силовой линии равняется намаг-



Фиг. 6. Кривые намагничивания некоторых материалов

ничающей силе (произведению тока на число витков):

$$\oint H dl = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + \dots = wI. \quad (16)$$

Имея в виду, что

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{\Phi}{\mu S},$$

получим:

$$\frac{\Phi l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{\Phi l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{\Phi l_3}{\mu_3 S_3} + \dots = wI;$$

соответственно величина магнитного потока составляет:

$$\Phi = \frac{wI}{\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_3}{\mu_3 S_3} + \dots} = \frac{wI}{\sum \frac{l}{\mu S}} = \frac{wI}{R_m}. \quad (17)$$

Соотношение это дало основание по аналогии с электрической цепью называть произведение тока на число витков магнитодвижущей силой, выражение $\sum \frac{l}{\mu S}$ —

магнитным сопротивлением, а всё выражение (17) — законом Ома для магнитной цепи.

Непосредственное использование формулы Ома для магнитной цепи при расчётах невозможно, так как входящая в формулу

магнитная проницаемость μ изменяется в зависимости от магнитной индукции, следовательно, и от магнитного потока.

В тех случаях, когда необходимо произвести расчёт магнитной цепи по заданному магнитному потоку, поступают следующим образом. Вычерчиваем среднюю индукционную линию и отмечаем участки l , вдоль которых магнитная индукция имеет одно и то же значение. По заданному магнитному потоку вычисляем магнитную индукцию на отдельных участках магнитной цепи

$$B = \frac{\Phi}{S}.$$

Затем по кривым намагничивания для данного сорта материала находим для каждого значения магнитной индукции напряжённость магнитного поля. Напряжённость магнитного поля в воздухе определяется по формуле

$$H_{\text{возд}} = 0,8 B \frac{a}{\text{см}},$$

если B выражено в Гс.

Умножая найденные значения H на длины соответствующих участков средней силовой линии, определяем потребное число ампер-витков для каждого участка магнитной цепи (Hl). Складывая значения потребных ампер-витков по отдельным участкам, получаем потребную намагничивающую силу wI для образования в заданной магнитной цепи потока Φ .

В тех случаях, когда требуется подсчитать магнитный поток при заданных ампер-витках, определяют потребные ампер-витки при нескольких значениях магнитного потока; построив на основании расчётов кривую $\Phi = f(wI)$, можно найти тот магнитный поток, который получается при заданных ампер-витках.

Электромагнитная индукция. Во всяком контуре, когда меняется пронизывающий его магнитный поток, наводится э. д. с. индукции независимо от того, какими причинами это изменение магнитного потока вызывается. Величина наведённой э. д. с. по закону Фарадея—Максвелла определяется для одного витка:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (18)$$

или когда контур состоит из w витков

$$e = - w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (19)$$

Произведение числа витков на магнитный поток называется магнитным потоко-сцеплением.

Знак минус в формулах (18) и (19) объясняется тем, что индуцированная э. д. с. стремится воспрепятствовать производимому изменению магнитного потока.

При движении прямолинейного проводника перпендикулярно силовым линиям магнитного поля в проводнике возникает также э. д. с. индукции, определяемая по формуле

$$e = Blv, \quad (20)$$

где B выражается в $\frac{\text{вб}}{\text{см}^2}$;

l — длина проводника в см (активная длина, т. е. длина, находящаяся в магнитном поле);

v — скорость движения проводника относительно поля, выражаемая в $\frac{\text{см}}{\text{сек}}$.

При движении проводника под углом к магнитному полю э. д. с. подсчитывается по формуле

$$e = B \cdot l \cdot v \sin(\bar{B}, \bar{v}). \quad (21)$$

Самоиндукция — явление наведения э. д. с. в контуре, когда изменяется магнитный поток за счёт изменения тока в самом контуре. Э. д. с. самоиндукции определяется по формулам (18) и (19). Когда магнитная цепь не содержит ферромагнитных материалов или не насыщена ($\mu = \text{const}$), магнитный поток и ток являются величинами прямо пропорциональными, и потому э. д. с. самоиндукции может быть выражена так:

$$e = -w \frac{d\Phi}{di} \cdot \frac{di}{dt} = w \frac{\Phi}{i} \frac{di}{dt} = -L \frac{di}{dt}, \quad (22)$$

где L — коэффициент самоиндукции, или индуктивность.

Коэффициент самоиндукции, или индуктивность, равен числу потокоцеплений, создаваемых единицей тока

$$L = w \frac{\Phi}{i}. \quad (23)$$

Индуктивность в практической системе единиц измеряется *генри* (гн). Индуктивность цепи или катушки равна 1 гн, когда при равномерном изменении тока на 1 а в 1 сек. в ней наводится э. д. с., равная 1 в; 1 гн равен 10^9 абсолютных электромагнитных единиц (сантиметров).

Коэффициенты самоиндукции в частных случаях (при постоянном значении магнитной проницаемости среды).

а) Прямолинейный провод длиной l , радиус круглого сечения r , относительная магнитная проницаемость материала μ_r , обратный провод земля:

при постоянном токе

$$L_0 = 2l \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 - \frac{\mu_r}{4} \right); \quad (24)$$

при переменном токе низкой частоты

$$L = L_0 - \frac{\mu_r l k^2}{48} \left(1 - \frac{13}{180} k^2 \right), \quad (25)$$

при этом полагаем

$$k = \mu_r \gamma \omega S,$$

где S — сечение провода, γ — удельная проводимость материала провода,

если $k > 2$, то

$$L = L_0 - \frac{\mu_r l}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{2}{k}} \right);$$

при переменном токе высокой частоты

$$L = L_0 - \frac{\mu_r l}{2}. \quad (26)$$

б) Два параллельных прямолинейных провода круглого сечения радиуса r при

расстоянии между осями проводов d для постоянного тока

$$L_0 = 4l \left(\ln \frac{d}{r} + \frac{\mu_r}{4} - \frac{d}{l} \right), \quad (24)$$

и если $\mu_r = 1$ и $l \gg d$, то

$$L_0 = 4l \left(\ln \frac{d}{r} + \frac{1}{4} \right). \quad (25)$$

Для переменного тока, полагая $k = \mu_r \gamma \omega S$, имеем:

$$L = 4l \left(\ln \frac{d}{r} - \frac{d}{l} + \Delta \right), \quad (26)$$

причём для низкой частоты

$$\Delta = \frac{\mu_r}{4} - \frac{\mu_r k^2}{96} \left(1 + \frac{13}{180} k^2 \right);$$

для высокой частоты

$$\Delta = \frac{\mu}{4} \sqrt{\frac{2}{k}};$$

для очень высокой частоты $\Delta = 0$.

в) Цилиндрическая катушка с равномерно навитой обмоткой из w витков: радиус цилиндра R , длина l , толщина обмотки мала по сравнению с l .

Для длинной катушки

$$L = \frac{(2\pi R w)^2}{l} \left[1 - \frac{8R}{3\pi l} + \frac{R^2}{2l^2} - \frac{R^4}{4l^4} \right]; \quad (27)$$

для коротких катушек

$$L = 2\pi R w^2 \left[2 \left(1 + \frac{l^2}{32R^2} - \frac{l^4}{1024R^4} \right) \ln \frac{8R}{l} - \left(1 - \frac{l^2}{64R^2} - \frac{l^4}{768R^4} \right) \right]. \quad (28)$$

г) Три параллельных прямолинейных провода длиной l круглого сечения радиуса r при произвольном расположении проводов на расстоянии d_{km} друг от друга. Индуктивность первого провода будет

$$L_1 = l \left(2 \ln \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{13}}}{r} + 0,5 \mu \right). \quad (29)$$

Индуктивность других двух проводов L_2 и L_3 получается путём круговой перестановки индексов при d .

Взаимная индукция — явление наведения э. д. с. в контуре, когда изменяется магнитный поток, за счёт изменения тока в другом контуре. Э. д. с. взаимной индукции подсчитывается по формулам (18) и (19). Для цепей без ферромагнитных материалов э. д. с. взаимной индукции подсчитывается по формуле, тождественной с формулой (20):

$$e = -M \frac{di}{dt},$$

где M — коэффициент взаимной индукции, или взаимоиנדуктивность.

Коэффициент взаимной индукции измеряется в *генри*.

Коэффициенты взаимной индукции различных контуров при постоянной магнитной проницаемости среды определяются следующими формулами.

а) Два круглых витка радиусов R_1 и R_2 , плоскости которых параллельны и центры расположены на расстоянии d на прямой, перпендикулярной к их плоскостям.

Полагая $R_2 = R_1 = C$, имеем:

$$M = 4\pi R_1 \ln \frac{8R_1}{\sqrt{d^2 + c^2}} \left[1 + \frac{c}{2R_1} + \frac{3d^2 + c^2}{16R_1^2} - \frac{3d^2c + c^3}{32R_1^3} \right] - \left(2 + \frac{c}{2R_1} + \frac{d^2 - 3c^2}{16R_1^2} - \frac{6d^2c - c^3}{48R_1^3} \right). \quad (30)$$

Более простая, но менее точная формула:

$$M = 4\pi R_1 \left(\ln \frac{8R_1}{\sqrt{d^2 + c^2}} - 2 \right). \quad (31)$$

б) Два параллельных провода круглого сечения длиной l на расстоянии d друг от друга:

$$M = 2l \left(\ln \frac{l + \sqrt{l^2 + d^2}}{d} - \frac{\sqrt{l^2 + d^2}}{l} + \frac{d}{l} \right); \quad (32)$$

при $l \gg d$

$$M = 2l \left(\ln \frac{2l}{d} - 1 \right). \quad (33)$$

в) Для двух двухпроводных линий (1—2) (3—4) длиной l прямые провода 1 и 3, обратные провода 2 и 4:

$$M = 2l \ln \frac{d_{1-4} \cdot d_{2-3}}{d_{1-3} \cdot d_{2-4}}, \quad (34)$$

где d — расстояние между осями проводов соответствующих индексов.

Если линии расположить так, чтобы плоскость проводов одной линии была перпендикулярна и проходила через середину плоскости проводов другой линии, то коэффициент взаимной индукции $M = 0$. Для уменьшения взаимной индуктивности линий провода линии перекрещивают через определённые расстояния. Такое перекрещивание проводов называют транспозицией.

Энергия магнитного поля (W). В магнитном поле содержится энергия, которая с большей или меньшей плотностью распределяется по всему пространству, занимаемому магнитным полем. Энергия магнитного поля получается за счёт той электрической работы, которая совершается электрическим током во время создания магнитного поля:

$$W = \int_0^t (-e_L) idt = \int_0^\Phi id\Phi \text{ дж.} \quad (35)$$

При постоянном значении магнитной проницаемости $\mu = \text{const}$ энергия магнитного поля может быть выражена через индуктивность цепи:

$$W = \int_0^t (-e_L) idt =$$

$$= \int_0^I Lidi = L \frac{I^2}{2} \text{ дж.} \quad (36)$$

Плотность энергии электромагнитного поля представляет энергию, сосредоточенную в единице объёма. В том случае, когда магнитная проницаемость постоянна, что для ферромагнитных материалов справедливо лишь при малых насыщениях, плотность энергии магнитного поля будет

$$\frac{dW}{dV} = \int_0^B HdB = \frac{HB}{2} \frac{\text{дж}}{\text{см}^3}. \quad (37)$$

Потери на гистерезис или потери на перемагничивание пропорциональны площади, ограниченной петлёй гистерезиса. Поглощаемая на перемагничивание энергия выделяется в виде тепла. На основании исследования большого количества образцов разных сортов ферромагнитных материалов получена следующая эмпирическая формула для подсчёта потерь мощности, обусловленной явлением гистерезиса:

$$P = \tau B_m^{1,6} V f, \quad (38)$$

где P — мощность в вт ;

B_m — максимальная магнитная индукция в гс ;

f — число циклов перемагничивания в 1 сек.;

V — объём перемагничиваемого тела в см^3 ;

τ — коэффициент, зависящий от материала (табл. 1).

Таблица 1

Значения коэффициентов τ для различных сортов ферромагнитных материалов

| Материалы | τ |
|---|-------------------------------------|
| Электролитическое отожжённое железо | $0,00078 \cdot 10^{-7}$ |
| Динамная сталь | $0,00054 \cdot 10^{-7}$ |
| Динамная листовая сталь | $0,0013 \div 0,0015 \cdot 10^{-7}$ |
| Кровельная сталь | $0,004 \cdot 10^{-7}$ |
| Кровельная сталь стожённая | $0,002 \cdot 10^{-7}$ |
| Трансформаторная сталь | $0,0006 \div 0,00075 \cdot 10^{-7}$ |
| Чугун | $0,013 \cdot 10^{-7}$ |

Формула (38) даёт хорошие результаты для магнитных индукций от 1 000 до 12 000 гс .

Для больших магнитных индукций более точные значения потерь на гистерезис получаются по формуле

$$P = \left[a \frac{f}{100} \cdot \frac{B_m}{10\,000} + b \frac{f}{100} \left(\frac{B_m}{10\,000} \right)^2 \right] \frac{\text{вт}}{\text{кг}}, \quad (39)$$

где все величины те же, что и в формуле (38). Потери мощности на гистерезис получаются по этой формуле для 1 кг перемагничиваемого железа. Значения коэффициентов a и b даны в табл. 2.

Таблица 2
Значения коэффициентов a и b

| Материалы | Коэффициенты | Толщина листов в мм | | |
|-----------------------------|--------------|---------------------|-----|------|
| | | 1 | 0,5 | 0,35 |
| Обыкновенная динамная сталь | a | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| | b | 3,5 | 3,5 | 3,8 |
| Высоколегированная сталь | a | — | 0,4 | 0,3 |
| | b | — | 2,6 | 2,1 |

Формулы для подсчёта потерь на гистерезис пригодны лишь для симметричных циклов намагничивания.

Токи Фуко. Если в переменном магнитном поле находятся проводящие тела, то в них под действием индуцированных э. д. с. возникают переменные электрические токи, называемые токами Фуко. Тепло, выделяемое по закону Джоуля—Ленца в проводящих телах, называется потерями на токи Фуко.

В цилиндрическом стержне с диаметром d (в мм), ось которого параллельна направлению магнитного потока, потери мощности на токи Фуко равны при индукции B (в гс), равномерно распределённой по сечению:

$$P_f = \frac{1}{2\rho} k^2 f^2 d^2 B_m^2 V \quad (40)$$

Потери на токи Фуко в листах с толщиной d :

$$P_f = \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{\rho} k^2 f^2 d^2 B_m^2 V.$$

Принимая удельное сопротивление стали $\rho = 10^{-5}$ ом·см и синусоидальную форму э. д. с., для которой коэффициент формы $k = 1,11$, потери на токи Фуко получим:

а) для круглых проволок

$$P_f = 0,62 f^2 d^2 B_m^2 V \cdot 10^{-13} \text{ вт};$$

б) для листов

$$P_f = 1,64 f^2 d^2 B_m^2 V \cdot 10^{-13} \text{ вт},$$

где f — частота переменного тока в гц;

d — толщина (диаметр) проводника в мм;

B_m — максимальная магнитная индукция в гс;

V — объём стали в см³.

Механические силы в магнитном поле могут быть сведены к внутренним силам маг-

нитного поля, а именно: к силам натяжения вдоль линий поля и к силам давления, перпендикулярным к его направлению. Значение этих сил, отнесённых к единице поверхности, равно энергии, отнесённой к единице объёма:

$$\frac{F}{S} = \int H dB.$$

Для проводов с током i , расположенных в магнитном поле, механические силы следует вычислять из элементарных сил, действующих на отдельные элементы контура. Обозначая элемент контура через dl , силу тока в нём i , магнитную индукцию поля — B и угол, составленный элементом dl с вектором B , через α , имеем для элементарной силы

$$dF = iB \sin \alpha dl. \quad (41)$$

Если поле однородно, для прямолинейного проводника имеем:

$$F = Bil \sin(\bar{B}, l). \quad (42)$$

Направление силы определяется по правилу левой руки.

Подъёмная сила подковообразного электромагнита определяется по формуле

$$F = 2S \frac{B^2}{2\mu_0} \frac{d\mu}{d\mu_0}, \quad (43)$$

где S — поверхность одного полюса подковообразного магнита в см².

Взаимодействие проводников с током. Аналитическое определение силы взаимодействия двух проводников с током может быть сделано только для простейших случаев, когда проводники расположены симметрично относительно друг друга и когда магнитная индукция, создаваемая проводником с током, может быть определена в любой точке поля.

Механическая сила взаимодействия между двумя параллельными проводниками определяется формулой

$$F = 2,04 I_1 I_2 \frac{l}{a} \cdot 10^{-8} \text{ кг}, \quad (44)$$

где I_1 и I_2 — токи, протекающие по проводникам, выраженные в а;

a — расстояние между проводниками в см;

l — длина проводов в см.

Направление силы взаимодействия зависит от направления токов. Проводники с токами одного направления притягиваются, а с разным направлением токов — отталкиваются.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Современная теория строения материи, объясняющая большинство электрических и магнитных явлений, считает, что всякий атом вещества состоит из ядра, содержащего положительный заряд, и из электронов — отрицательно заряженных частиц, вращающихся вокруг ядра по замкнутым орбитам.

В нейтральном состоянии противоположные заряды составных частей атома равны между собой, и их электрические поля вне атома, действуя в противоположные сторо-

ны, уравновешивают друг друга и никакого действия не производят. Если тело имеет избыток электронов, то оно оказывается заряженным отрицательным зарядом; если тело имеет недостаток электронов, то оно оказывается заряженным положительным зарядом. Вокруг заряженного тела существует электрическое поле избыточного заряда. Помимо протонов и электронов в ядрах ато-

* Для одного полюса вдвое меньше.

мов существуют ещё частицы, называемые нейтронами.

Электрон представляет собой атом отрицательного заряда, материальную частицу наименьшего возможного отрицательного заряда, обладающего массой.

Простейшим ядром является ядро атома водорода, называемое протоном, имеющее положительный заряд, равный по величине заряду электрона.

Заряд электрона на основании ряда исследований последних лет можно считать равным $0,159 \cdot 10^{-20} \text{ к}$, или $4,77 \cdot 10^{-10}$ абсолютных электростатических единиц.

Масса электрона атома водорода в 1848 раз меньше самого атома и равна $9,02 \cdot 10^{-26} \text{ г}$. Электрон атома водорода вращается по замкнутой орбите вокруг ядра атома. Радиус орбиты приблизительно равен $0,53 \cdot 10^{-8} \text{ см}$. Число электронов, вращающихся вокруг ядра атома данного элемента, определяет его порядковый номер в Менделеевской системе элементов.

Электрическое поле — особое состояние пространства, обусловленное присутствием в нём электрических зарядов. Электрическое поле с неподвижными зарядами называется электростатическим полем.

Закон Кулона. Электрическое поле какого-нибудь заряда может быть обнаружено по силе, с которой это поле действует на другой заряд. Согласно опытному закону, открытому Кулоном, два заряда q_1 и q_2 , находящихся в однородной среде и отстоящих друг от друга на расстоянии r , действуют друг на друга с силой, пропорциональной произведению этих зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon_r r^2}. \quad (45)$$

Коэффициент ϵ_r характеризует качество среды, в которой происходит взаимодействие зарядов, и называется относительным диэлектрическим коэффициентом среды или относительной диэлектрической проницаемостью.

Для изотропной среды, отличной от вакуума, закон Кулона в рационализированной практической системе единиц выражается в следующем виде:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\text{дж}}{\text{см}}, \quad (46)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{\text{Ф}}{\text{см}} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{\text{к}}{\text{г} \cdot \text{см}}; \quad (46,а)$$

$$\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-14} \approx \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}} \frac{\text{Ф}}{\text{см}}$$

есть диэлектрическая проницаемость вакуума (для вакуума $\epsilon_r = 1$).

Напряжённость электрического поля E характеризует его механические действия и численно равна силе, с которой поле действовало бы на единицу положительного электричества, помещённого в данную точку:

$$E = \frac{F}{q_1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0} \cdot \frac{q_2}{r^2} \frac{\text{в}}{\text{см}}. \quad (47)$$

Напряжённость электрического поля от нескольких зарядов равна геометрической сумме напряжённостей полей от каждого заряда в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n. \quad (48)$$

Электрическое напряжение. Внесённые в электрическое поле заряды под действием сил со стороны поля перемещаются, при этом поле совершает работу. Предел отношения работы, которую совершали бы силы поля при перемещении заряда из одной точки в другую, к величине заряда, когда он стремится к нулю, называется электрическим напряжением между этими точками и обозначается символом U .

В практической системе электрических единиц за единицу электрического напряжения принимается 1 в. Разность потенциалов между двумя точками равна 1 в, когда для переноса 1 к электричества из одной точки в другую требуется затратить 1 дж работы.

Потенциал электрического поля в какой-либо точке представляет отношение работы, которая была бы произведена силами поля при перенесении какого-либо заряда за пределы поля, к переносимому заряду, когда последний стремится к нулю. Потенциал, как и напряжение поля, являются скалярными величинами и измеряются в вольтах. Для однородного электростатического поля

$$\varphi_A - \varphi_B = U = Ed, \quad (49)$$

где φ_A и φ_B — потенциалы электрического поля;

U — электрическое напряжение;

E — напряжённость электрического поля;

d — расстояние между заряженными пластинами.

Поляризация диэлектриков. Хотя диэлектрики и не проводят электричества, тем не менее они испытывают те или иные изменения под действием электрического поля. Под действием электрического поля в диэлектрике выявляются определённым образом направленные диполи¹ и каждый из них создаёт собственное электрическое поле. Поля полюсов диполя накладываются на поле свободных зарядов, и таким образом создаётся то поле, которое имеется в действительности в пространстве, заполненном диэлектриком. Электрическое поле, создаваемое диполями, пропорционально напряжённости внешнего электрического поля. Электрическое смещение (индукция) поля диэлектрика численно равно

$$D = \epsilon_0 \vec{E} + \chi \vec{E} = E(\epsilon_0 + \chi), \quad (50)$$

где D — электрическое смещение в $\frac{\text{к}}{\text{см}^2}$;

¹ Диполь — два равных, но противоположных по знаку заряда, находящихся на весьма малом расстоянии друг от друга.

ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума в $\frac{F}{cm}$;

E — напряжённость внешнего электрического поля в $\frac{e}{cm}$;

κ — коэффициент поляризации диэлектрика в $\frac{F}{cm}$.

Отношение электрической индукции к напряжённости поля

$$\frac{D}{E} = \epsilon_0 + \kappa = \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0, \quad (51)$$

равное сумме диэлектрического коэффициента вакуума и коэффициента поляризации, называется диэлектрическим коэффициентом среды, а отношение диэлектрического коэффициента среды к диэлектри-

ческому коэффициенту вакуума $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ —

относительным диэлектрическим коэффициентом среды.

Значения диэлектрических коэффициентов для различных материалов приведены в табл. 3.

а объёмная плотность энергии

$$W = \frac{1}{2} ED = \frac{1}{2} \frac{D^2}{\epsilon} \text{ дж}, \quad (53)$$

где E — напряжённость электрического поля в $\frac{e}{cm}$;

D — электрическое смещение $\frac{K}{cm^2}$;

V — объём в cm^3 .

Механические (пондеромоторные) силы в электрическом поле. Образование электрического поля в какой-либо среде связано с определённым видоизменением физического состояния среды с накоплением в ней энергии и с появлением внутренних сил. Сила натяжения, которую испытывает среда в направлении поля на единицу площади, равна

$$F = \frac{ED}{2} \frac{дж}{cm^2}. \quad (54)$$

Таким образом, энергия, сосредоточенная в единице объёма электрического поля, численно равна силе натяжения и давления на единицу площади.

Таблица 3

Характеристики изоляционных материалов (диэлектриков) при температуре $t=20^\circ C$ и давлении 760 мм рт. ст.

| Материалы | Удельный вес g/cm^3 | Относительный диэлектрический коэффициент ϵ_r | Электрическая прочность $кв/мм*$ | Теплопроводность $\lambda \frac{дж}{cm \text{ сек } ^\circ C}$ | Объёмное сопротивление $\rho \text{ ом}\cdot\text{см}$ |
|--------------------------------------|--------------------------|--|-------------------------------------|---|---|
| Асфальт естественный | 1,1—1,3 | 2,7 | 13—16 | — | 10^{14} |
| Бакелит (гетинакс) круглый | 1,2—1,3 | 3,8—5 | 10—15 | 0,0017 | $10^{11}—10^{15}$ |
| Бакелит (гетинакс) листовой | 1,3—1,4 | 4,5—6 | 10—20 | 0,0017 | $10^{11}—10^{14}$ |
| Бумага кабельная сухая | 0,8 | 2,3—3,5 | 6—9 | 0,0013 | $10^{13}—10^{14}$ |
| Бумага кабельная, пропитанная маслом | — | 3,4—3,7 | 10—25 | — | 10^{15} |
| Воздух при давлении 760 мм рт. ст. | 0,00121 | 1 | 3—4 | 0,006 | — |
| Дуб парафинированный | 0,76 | 4,5—5 | 4—7 | — | 10^{13} |
| Берёза сухая | 0,64 | 2—3 | 3—5 | — | 10^{10} |
| Бук в сухом виде | 0,73 | 3—3,5 | 5—6 | — | 10^{12} |
| Лакированная ткань | 1,10—1,35 | 3,5—5 | 32—45 | 0,0023 | $10^{12}—10^{13}$ |
| Масло трансформаторное | 0,85—0,89 | 2—2,5 | 5—18 | 0,002 | $10^{12}—10^{13}$ |
| Миканит | 2,2 | 4,6—6 | 15—20 | 0,001 | 10^{15} |
| Мрамор | 2,7 | 8,3 | 2—3 | 0,03 | $10^7—10^8$ |
| Парафин | 0,85—0,92 | 2—2,2 | 15—30 | 0,002 | 10^{15} |
| Прессшпан сухой | 0,9—1,3 | 2,5—4 | 8—10 | 0,0017 | $10^9—10^{13}$ |
| Прессшпан, пропитанный маслом | — | 4—5 | 12—17 | — | $10^{12}—10^{13}$ |
| Резина листовая | 1,3—1,8 | 3,5 | 10—15 | 0,001 | $10^{13}—10^{14}$ |
| Слюда мусковит | 2,8 | 6—7,5 | 120—200 | 0,0036 | $10^{14}—10^{15}$ |
| Слюда флогопит | 2,8 | 4—6 | 80—150 | 0,0036 | $10^{13}—10^{14}$ |
| Стекло | 2,5 | 5,5—10 | 10—40 | 0,011 | $10^{11}—10^{14}$ |
| Фарфор | 2,4—2,7 | 4,5—6,5 | 6—10 | 0,01 | $10^{14}—10^{15}$ |
| Фибра | 1,2—1,4 | 3—5 | 4—11 | 0,011 | 10^{10} |
| Шифер | 2,7—2,9 | 6—7,5 | 1,5—3 | 0,02 | $10^7—10^{13}$ |
| Целлулоид | 1,45 | 4—16 | 10—15 | — | $2 \cdot 10^{10}$ |
| Эбонит | 1,15—1,3 | 2—3,5 | 8—10 | 0,0018 | 10^{17} |

Энергия электрического поля для простейшего случая однородного поля, образующегося между двумя параллельными пластинками, равна

$$W = \frac{1}{2} EDV \text{ дж}, \quad (52)$$

Электрическая ёмкость численно равна отношению заряда уединённого проводника к его потенциалу:

$$C = \frac{Q}{\varphi} = \text{const.}$$

* Данные этого столбца следует считать ориентировочными, так как электрическая прочность зависит от толщины испытуемого образца.

В практической системе единиц ёмкость измеряется в *фарадах*. Одна фарада (F) — это ёмкость такого уединённого проводника,

у которого при потенциале его в 1 в собирается заряд, равный 1 к.

Так как фарада представляет собой очень большую ёмкость (ёмкость земного шара равна $0,7 \cdot 10^{-3}$ Ф), то ёмкость принято измерять в микрофарадах:

$$1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф},$$

или в микромикрофарадах:

$$1 \text{ мкмкФ} = 10^{-12} \text{ Ф}.$$

В абсолютной электростатической системе единиц ёмкость измеряют в сантиметрах:

$$1 \text{ Ф} = 9 \cdot 10^{11} \text{ см}.$$

Конденсатором называют устройство, предназначенное для накопления электрических зарядов и электрической энергии в их полях. Энергия, накопленная в электрическом поле конденсатора

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} \sum_k q_k Q_k = \frac{1}{2} Q U = \\ &= C \frac{U^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}. \end{aligned} \quad (55)$$

Конденсатор представляет устройство из двух проводников, называемых обкладками конденсатора, разделённых диэлектриком. Ёмкость конденсатора характеризует его способность воспринимать больший или меньший заряд и зависит от геометрической формы и размеров обкладок, а также от природы разделяющего их диэлектрика.

Ёмкость различных уединённых проводящих тел (в фарадах) приводится ниже; при этом считают, что противоположный по знаку заряд распределён на бесконечно удалённой поверхности, охватывающей данное тело и имеющей потенциал, равный нулю:

а) шар радиусом R в среде с диэлектрическим коэффициентом ϵ :

$$C = 4 \pi \epsilon R; \quad (56)$$

б) тонкий диск радиусом R :

$$C = 8 \epsilon R; \quad (57)$$

в) круговой цилиндр (круглый проводник) радиусом R и длиной l при $l \gg R$:

$$C = \frac{2 \pi \epsilon l}{\ln \frac{l}{R}}. \quad (58)$$

Ёмкость конденсаторов (в фарадах):

а) плоский конденсатор, расстояние между обкладками которого d и поверхность каждой из которых S :

$$C = \frac{\epsilon S}{d}; \quad (59)$$

б) плоский конденсатор, между обкладками которого имеются параллельные слои различных диэлектриков, с диэлектрическим коэффициентом $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_n$ и толщиной $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$:

$$C = \frac{S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} + \frac{d_3}{\epsilon_3} + \dots + \frac{d_n}{\epsilon_n}}; \quad (60)$$

в) два параллельных диска радиусом R , толщиной b на расстоянии d друг от друга при $R \gg b$ и $R \gg d$:

$$C = \frac{\pi \epsilon R^2}{d} + \epsilon R \left[1 + \ln \frac{16 \pi (b+d) R}{d^2} + \frac{b}{d} \ln \frac{b+d}{d} \right]; \quad (61)$$

г) цилиндрический конденсатор длиной l , радиусы внешней и внутренней обкладок которого R_1 и R_2 :

$$C = \frac{2 \pi \epsilon l}{\ln \frac{R_1}{R_2}}; \quad (62)$$

д) два параллельных цилиндра радиусов R_1 и R_2 , длиной l , расположенных один вне другого при расстоянии d между осями:

$$C = \frac{2 \pi \epsilon l}{\ln \frac{1}{2 R_1 R_2} [d^2 - (R_1^2 + R_2^2) + A^2]}, \quad (63)$$

где

$$A^2 = \sqrt{d^4 - 2 d^2 (R_1^2 + R_2^2) + (R_1^2 - R_2^2)^2}$$

при $d \gg R_1$ и $d \gg R_2$

$$C \approx \frac{2 \pi \epsilon l}{\ln \frac{d^2}{R_1 R_2}}; \quad (64)$$

е) бесконечно большая плоскость и цилиндр радиусом R и длиной l , ось которого параллельна плоскости и находится на расстоянии d от неё:

$$C = \frac{2 \pi \epsilon l}{\ln \left(\frac{d + \sqrt{d^2 + R^2}}{R} \right)} \quad (65)$$

при $l \gg d \gg R$

$$C = \frac{2 \pi \epsilon l}{\ln \frac{2d}{R}}. \quad (66)$$

Последовательное соединение конденсаторов. Если электрические поля последовательно соединённых конденсаторов не влияют друг на друга, то все конденсаторы имеют один и тот же заряд:

$$q = C_1 U_1 = C_2 U_2 = C_3 U_3 = \dots C_n U_n.$$

Эквивалентная ёмкость группы последовательно включённых конденсаторов равна

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_s} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \\ &+ \frac{1}{C_n} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{C_k}, \end{aligned} \quad (67)$$

Эквивалентная ёмкость при последовательном соединении конденсаторов уменьшается.

Параллельное включение конденсаторов. При параллельном включении конденсаторов полный заряд всей группы равен сумме зарядов отдельных конденсаторов:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \sum_{k=1}^{k=n} q_k. \quad (68)$$

Эквивалентная ёмкость группы параллельно включённых конденсаторов равна

$$C_0 = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n = \sum_{k=1}^n C_k. \quad (69)$$

Эквивалентная ёмкость при параллельном включении конденсаторов увеличивается.

Воздействие электрических полей на диэлектрики. Опыт показывает, что после сообщения заряда конденсатору с неоднородным диэлектриком разность потенциалов на его обкладках убывает, стремясь к некоторому пределу. После разряда конденсатора на его обкладках вновь появляется разность потенциалов, стремящаяся также к некоторому пределу. Заряд, вызывающий эту разность потенциалов, носит название остаточного заряда и в однородных диэлектриках не наблюдается.

Явление остаточного заряда объясняют диэлектрической вязкостью, которая заключается в том, что для установления смещения, соответствующего данной напряжённости электрического поля, необходимо некоторое время. Диэлектрическая вязкость влечёт за собой уменьшение ёмкости конденсаторов в высокочастотных полях. В связи с диэлектрической вязкостью наблюдается явление нагревания диэлектрика в высокочастотных полях.

Пробой диэлектрика. Деформация электрического смещения в диэлектриках может возрастать лишь до известного предела, при переходе за который происходит разряд и диэлектрик разрушается — пробивается. Электрическая прочность изолирующих материалов характеризуется пробивным градиентом напряжения, соответствующим предельной величине смещения.

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Ток и плотность тока. Процесс перемещения электрических зарядов носит название электрического тока. Величина тока определяется соотношением

$$i = \frac{dq}{dt}, \quad (70)$$

где dq — количество электричества, протекающее за время dt через поперечное сечение проводника или диэлектрика.

Ток, приходящийся на единицу площади поперечного сечения проводника, называют плотностью тока:

$$\delta = \frac{di}{ds}. \quad (71)$$

Ток, не изменяющийся во времени, называют постоянным током; обозначается он буквой I в отличие от изменяющегося тока, который обозначается буквой i .

Электрические токи измеряются в амперах. Один международный ампер есть величина неизменяющегося тока, который, проходя через водный раствор азотнокислого серебра, выделяет в 1 сек. 1,11800 мг серебра.

Первый закон Кирхгофа. В силу непрерывности электрического тока ток, проходящий через замкнутую поверхность, равен нулю. В соответствии с этим первый закон Кирхгофа в применении к разветвлённым цепям можно сформулировать следующим образом: алгебраическая сумма токов, сходящихся в точке разветвления, равна нулю, или сумма притекающих токов равна сумме утекающих.

Электродвижущая сила, напряжение, разность потенциалов. Всякую причину, вызывающую электрический ток или могущую его вызвать, называют электродвижущей силой (э. д. с.).

Э. д. с., действующую на некотором участке внешней цепи, называют электрическим напряжением или просто напряжением.

В том случае, когда электрическое напряжение имеет потенциал, напряжение на концах участка есть разность потенциалов на его концах. Э. д. с., напряжение и разность потенциалов в практической системе единиц измеряются в вольтах.

Закон Ома определяет ток в замкнутой проводящей неразветвлённой цепи, когда в ней действует источник энергии с э. д. с.:

$$I = \frac{e}{R}, \quad (72)$$

где I — ток в а;

e — э. д. с. источника энергии;

R — сопротивление всей замкнутой цепи: внешнее (нагрузки) и внутреннее (источника тока).

Для отдельных участков замкнутой цепи

$$I = \frac{U}{r}, \quad (73)$$

где U — напряжение на концах участка;

r — сопротивление участка.

Эта формула применима в том случае, когда в участке отсутствует э. д. с.

Электрическое сопротивление или просто сопротивление зависит от природы вещества проводника, его геометрических размеров и формы и может быть выражено приближённой формулой

$$r = \int_0^l \rho \frac{dl}{S},$$

где dl — элемент длины;

S — поперечное сечение проводника;

ρ — коэффициент, зависящий от природы вещества проводника и называемый удельным сопротивлением.

Если сечение проводника по всей длине однородно и одинаково, то

$$r = \rho \frac{l}{S}. \quad (74)$$

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется удельной проводимостью $\gamma = \frac{1}{\rho}$, и тогда

$$r = \frac{l}{\gamma S} \quad (75)$$

Удельное сопротивление и удельную проводимость можно отнести к различным единицам длины и площади поперечного сечения проводника. Обычно удельную проводимость относят к длине проводника в 1 м и площади поперечного сечения в 1 мм².

Сопротивление измеряется в омах. Один международный ом есть сопротивление (при неизменяющемся токе и при температуре тающего льда) ртутного столба длиной 106,300 см, имеющего одинаковое по всей длине сечение и массу 14,4521 г (сечение такого столба соответствует 1 мм²). Единицу проводимости, равную проводимости проводника, сопротивление которого равно 1 ом, называют с и мен с о м.

Температурный коэффициент представляет изменение сопротивления в 1 ом при нагревании его на 1°С. Сопротивление металлов с увеличением температуры увеличивается, поэтому значение температурного коэффициента металлов положительное. Сопротивление угля (металлических земель) электролитов с повышением температуры уменьшается, поэтому значение температурного коэффициента для них отрицательное. Увеличение или уменьшение сопротивления при нагревании проводников, с достаточной степенью точности в интервале температур от 0 до 150°С, может быть выражено

$$R_{tk} = R_{tn} [1 + \alpha (t_k - t_n)], \quad (76)$$

где R_{tk} — сопротивление при конечной температуре t_k ;

R_{tn} — сопротивление при начальной температуре t_n ;

α — температурный коэффициент.

Увеличение сопротивления проводника наблюдается и от действия магнитного поля. Особо резко это проявляется у висмута: при увеличении поля от 0 до $H = 16\,000$ э сопротивление висмута увеличивается на 75%. Этим свойством висмута пользуются для измерения сильных магнитных полей.

Свет также влияет на сопротивление проводника, что особенно сильно проявляется у селена. Чем сильнее освещён селен, тем меньше становится его сопротивление. Это свойство селена в последнее время очень широко используется для устройства всякого рода световых реле. При длительном действии света селен перестает реагировать на изменение освещённости.

Всякие примеси к металлам увеличивают их удельное сопротивление, точно так же и сплавы имеют большее удельное сопротивление, чем удельное сопротивление отдельных составных частей. Объясняется это тем, что в этом случае в проводнике больше неоднородностей и неправильностей в расположении атомов, вследствие чего длина и время свободного пробега атомов меньше, чем в соответствующих чистых однородных металлах. Неоднородность от примесей в металлах и сплавах понижает значение температурного коэффициента, поэтому в таких проводниках температура оказывает значительно меньшее влияние на изменение сопротивления.

Последовательным соединением источников электрической энергии и приёмников называется такое соединение, при котором конец одного соединяется с началом другого и т. д. При последовательном соединении ток во всех участках цепи имеет одно и то же значение. При последовательном соединении источников энергии результирующая Э. д. с.

$$e = e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_n = \sum_{k=1}^{k=n} e_k. \quad (77)$$

Таблица 4

Проводимости, удельные сопротивления, температурные коэффициенты, удельные веса, теплоёмкости и теплопроводности чистых металлов и некоторых сплавов

| Материалы | Удельная проводимость при 20°С сименс см | Удельное сопротивление при 20°С ом·мм ² м | Среднее значение темпе- ратурного коэффициента для темпе- ратур от 0 до 100°С | Удельный вес кг/дм ³ г/см ³ | Теплоём- кость кал °С см ³ | Теплопро- водность при 20°С кал °С сек |
|-----------------|--|--|--|---|--|--|
| | см | м | | г/см ³ дм ³ | | |
| Серебро | 62,11·10 ⁴ | 0,0161 | 0,00400 | 10,4 | 0,056 | 0,01 |
| Медь | 59,52·10 ⁴ | 0,0168 | 0,00445 | 8,9 | 0,094 | 0,92 |
| Золото | 42,19·10 ⁴ | 0,0237 | 0,00377 | 19,1 | 0,032 | 0,70 |
| Алюминий | 35,97·10 ⁴ | 0,0278 | 0,00423 | 2,65 | 0,214 | 0,42 |
| Молибден | 21,01·10 ⁴ | 0,0476 | 0,00435 | 10,2 | — | — |
| Вольфрам | 16,34·10 ⁴ | 0,0612 | 0,00464 | 18,7 | 0,037 | 0,38 |
| Цинк | 16,13·10 ⁴ | 0,0620 | 0,00390 | 7,0 | 0,093 | 0,265 |
| Платина | 11,55·10 ⁴ | 0,0866 | 0,00247 | 21,3 | 0,028 | 0,166 |
| Железо | 10,89·10 ⁴ | 0,0918 | 0,00625 | 7,9 | 0,119 | 0,14 |
| Кобальт | 9,17·10 ⁴ | 0,109 | 0,00658 | 8,9 | 0,103 | — |
| Никель | 7,25·10 ⁴ | 0,138 | 0,00621 | 8,8 | 0,11 | 0,14 |
| Олово | 6,99·10 ⁴ | 0,143 | 0,00440 | 7,2 | 0,055 | 0,157 |
| Свинец | 4,52·10 ⁴ | 0,221 | 0,00411 | 11,4 | 0,03 | 0,083 |
| Ртуть | 1,055·10 ⁴ | 0,948 | 0,00024 | 13,6 | 0,033 | — |
| Висмут | 0,72·10 ⁴ | 1,39 | 0,00364 | 9,8 | 0,031 | 0,019 |
| Уголь ретортный | 0,138·10 ⁴ | 7,25 | 0,0003 | 1,88 | — | — |
| Латунь | (50—15)·10 ⁴ | 0,02—0,06 | 0,002 | 8,5 | 0,9 | 0,26 |
| Мanganin | 3·10 ⁴ | 0,33 | 0,000006 | 8,5 | 0,181 | 0,10 |
| Никелин | 2,38·10 ⁴ | 0,42 | 0,0003 | 8,8 | — | — |
| Константан | 2,04·10 ⁴ | 0,49 | 0,00004 | 8,9 | 0,10 | 0,054 |
| Нейзильбер | (2,2—2)·10 ⁴ | 0,45—0,50 | 0,0004 | 8,5 | — | — |
| Нихром | (1,6—0,9)·10 ⁴ | 0,94—1,1 | 0,00015—0,0004 | — | — | — |

При последовательном соединении приёмников энергии полное сопротивление

$$R = r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n = \sum_{k=1}^{k=n} r_k. \quad (78)$$

Параллельным соединением источников электрической энергии или приёмников называется такое соединение, при котором начала всех источников энергии или соответственно приёмников соединяются вместе, точно так же как и концы. При параллельном соединении на концах каждой из ветвей действует одно и то же напряжение. При параллельном соединении источников энергии ток в неразветвлённой части I равен сумме токов в разветвлениях:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = \sum_{k=1}^{k=n} I_k. \quad (79)$$

При параллельном соединении приёмников энергии полная (эквивалентная) проводимость равна сумме проводимостей отдельных ветвей:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots + \frac{1}{r_n} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{r_k}, \quad (80)$$

или

$$g_j = g_1 + g_2 + g_3 + \dots + g_n = \sum_{k=1}^{k=n} g_k, \quad (81)$$

где $g = \frac{1}{r}$ и называется проводимостью.

Сопротивление проводников различных геометрических форм (в омах):

а) сопротивление слоя жидкости с удельной проводимостью γ между двумя металлическими параллельными пластинами одинаковой площади S , находящимися на расстоянии d друг от друга:

$$r = \frac{d}{\gamma S}; \quad (82)$$

б) сопротивление среды с удельной проводимостью γ между двумя одинакового радиуса R параллельными цилиндрами, длиной l , расстоянием между осями цилиндров d :

$$r = \frac{1}{\pi \gamma l} \ln \frac{d}{R}. \quad (83)$$

Следующие формулы дают величину переходного сопротивления заземляющих электродов для случая неограниченной среды с удельной проводимостью γ :

а) шар радиуса R :

$$r = \frac{1}{4 \pi \gamma R}; \quad (84)$$

б) полушар радиуса R :

$$r = \frac{1}{2 \pi \gamma R}; \quad (85)$$

в) круглая тонкая пластина радиуса R :

$$r = \frac{1}{8 \gamma R}; \quad (86)$$

г) цилиндр, радиус основания которого R , а длина l :

$$r = \frac{1}{2 \pi \gamma l} \ln \frac{l}{R}; \quad (87)$$

д) прямоугольная пластина со сторонами a и na , причём $n > 1$:

$$r \approx \frac{1}{\pi \gamma a \sqrt{A}} \ln \frac{1+n+\sqrt{A}}{1+n-\sqrt{A}}, \quad (88)$$

где

$$A = (1+n)^2 - \frac{8n}{\pi}.$$

Закон Джоуля—Ленца: количество тепла в малых калориях, выделяемого постоянным током в однородном проводнике, пропорционально квадрату силы тока в амперах, сопротивлению проводника в омах и времени, в течение которого проходит ток по проводнику, в секундах:

$$Q = 0,24 I^2 R t; \quad (89)$$

0,24 — механический эквивалент тепла, численно равный количеству тепла, выделяемому 1 дж электрической энергии.

Работа электрического тока, поглощаемая в проводнике:

$$W = Uq = UIt. \quad (90)$$

За единицу работы электрического тока в практической системе единиц принимается 1 дж = 10⁷ эрг (ватт-секунда). На практике пользуются более крупными единицами электрической работы: 1 гектоватт-час (гвт-ч), 1 киловатт-час (квт-ч), 1 мегаватт-час (мгвт-ч).

Мощность электрического тока равна количеству энергии, поглощаемой в единицу времени. Единицей мощности в практической системе единиц служит ватт (вольт-ампер). На практике пользуются более крупными единицами электрической мощности: 1 гектоватт (гвт), 1 киловатт (квт), 1 мегаватт (мгвт);

$$1 \text{ ЛС} = 736 \text{ вт} = 0,736 \text{ квт};$$

$$1 \text{ квт} = 1,36 \text{ ЛС}.$$

Второй закон Кирхгофа устанавливает связь между э. д. с. и падением напряжения в замкнутых контурах разветвлённых цепей. В замкнутом контуре алгебраическая сумма э. д. с. равна алгебраической сумме падения напряжения во всех сопротивлениях, входящих в этот контур.

Определение токов в разветвлённых цепях.

а) Метод уравнений Кирхгофа. Первый и второй законы Кирхгофа вполне точно и однозначно разрешают вопрос об определении токов в любых сложных разветвлённых цепях. Для определения токов во всех участках цепи произвольно назначают направление токов и составляют ряд уравнений, применяя первый закон Кирхгофа для отдельных точек разветвления и второй закон Кирхгофа для отдельных контуров. Если сложная цепь имеет n ветвей между a узлами, то определению подлежат n неизвестных токов. По первому закону Кирхгофа составляется $a - 1$ уравнений, так как для последнего узла уравнение получается как следствие предыдущих уравнений. Остальные $n - a + 1$ уравнений составляются по второму закону Кирхгофа.

При составлении уравнений следует обращать внимание на то, чтобы получаемые уравнения не были зависимы друг от друга, т. е. чтобы какое-либо из них не являлось следствием других. Для этого необходимо, чтобы в каждый новый контур, для которого составляется уравнение, входила хотя бы одна новая ветвь, ещё не входившая ни в один из ранее рассматривавшихся контуров. Если при решении составленных уравнений для тока в какой-либо ветви получится отрицательный знак, то это указывает на то, что ток в этой ветви имеет направление, обратное произвольно принятому при составлении уравнений.

б) Метод наложения (суперпозиции). В том случае, когда в сложной разветвлённой цепи действует несколько э. д. с., ток в любой ветви складывается из тех токов, которые получились бы в этой ветви, если бы в системе каждая э. д. с. действовала в отдельности. Каждая э. д. с. в отдельности создаёт во всех ветвях свою слагающую тока; алгебраическая сумма слагающих тока от каждой э. д. с. даёт величину тока при одновременном действии всех э. д. с. При определении слагающих токов от каждого источника энергии необходимо считать включёнными все внутренние сопротивления всех источников тока, даже тех, э. д. с. которых принимаются не действующими при определении данной слагающей тока. Метод суперпозиции применим лишь в тех случаях, когда все э. д. с. и сопротивления не изменяются при изменении тока.

в) Метод холостого хода и короткого замыкания даёт возможность весьма просто и быстро определить ток в одной из ветвей сложной разветвлённой цепи без одновременного определения токов во всех ветвях. По этому методу вся заданная сложная разветвлённая цепь, за исключением исследуемой ветви, рассматривается как один источник тока, зажимами которого являются те точки, которыми исследуемая ветвь присоединяется к сложной разветвлённой цепи. Для определения тока в какой-либо ветви поступают следующим образом: считают ветвь, в которой необходимо определить ток, разомкнутой (холостой ход) и определяют для этого случая разность потенциалов на концах разомкнутой цепи U_0 , после этого считают, что в ветвь, в которой определяется ток, включён источник энергии с э. д. с., равной U_0 . Величина тока определяется

$$I = \frac{U_0}{R_0 + R},$$

где I — ток в заданной ветви;

U_0 — разность потенциалов на концах разомкнутой ветви под действием источника тока;

R_0 — сопротивление всей сложной цепи между точками, к которым присоединена ветвь с интересующим нас током, включая и внутреннее сопротивление всех источников энергии;

R — сопротивление ветви, в которой определяется ток.

В том случае, когда в сложной цепи действует несколько источников энергии, ток в

заданной ветви определяется по методу холостого хода и короткого замыкания от каждого источника энергии в отдельности. Ток при одновременном действии всех источников энергии получается как алгебраическая сумма токов, которые получились бы, если бы каждая э. д. с. действовала в отдельности при наличии внутренних сопротивлений других источников энергии, но при отсутствии их э. д. с.

г) Метод трансформации электрических цепей. При определении токов и напряжений в сложных цепях можно внести в вычисления значительные упрощения, если путём последовательных преобразований (трансформаций) упростить цепь без изменения распределения токов в других частях цепи. Примером такого преобразования (трансформации) может служить замена двух параллельно включённых сопротивлений R_1 и R_2 одним эквивалентным по формуле

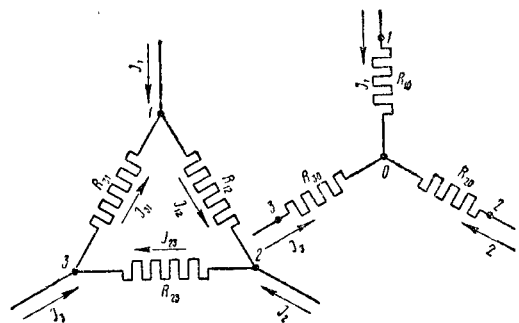
$$R_0 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Ещё большее упрощение сложных разветвлённых цепей может быть достигнуто, если отдельные замкнутые контуры (треугольники), в которых нет источников энергии, заменять эквивалентными разомкнутыми схемами в виде трёхконечной звезды или наоборот. Отдельные сопротивления эквивалентной звезды (фиг. 7) через заданные сопротивления схемы треугольника определяются следующим образом:

$$R_{10} = \frac{R_{31} \cdot R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad (91)$$

$$R_{20} = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad (92)$$

$$R_{30} = \frac{R_{31} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad (93)$$



Фиг. 7. Трансформация схемы звезды в схему треугольника, и наоборот

т. е. сопротивление луча звезды равно произведению сопротивлений соответственно прилежащих сторон треугольника, делённому на сумму сопротивлений всех трёх сторон треугольника. Для частного случая, когда сопротивления отдельных ветвей схемы треугольника между собой равны; $R_{12} = R_{23} = R_{31}$, сопротивления эквивалентной звезды $R_{10} = R_{20} = R_{30}$ также между собой будут равны:

$$R_{10} = R_{20} = R_{30} = \frac{R_{12}}{3}, \text{ или } R_{\Delta} = \frac{R_{\Delta}}{3},$$

т. е. сопротивления луча эквивалентной звезды равны одной трети сопротивления ветви треугольника. Отдельные сопротивления эквивалентного треугольника через заданные сопротивления схемы звезды удобнее определять, пользуясь значениями проводимостей. Для схемы фиг. 7

$$g_{12} = \frac{g_{10} \cdot g_{20}}{g_{10} + g_{20} + g_{30}}; \quad (94)$$

$$g_{23} = \frac{g_{20} \cdot g_{30}}{g_{10} + g_{20} + g_{30}}; \quad (95)$$

$$g_{31} = \frac{g_{10} \cdot g_{30}}{g_{10} + g_{20} + g_{30}}, \quad (96)$$

т. е. проводимость стороны треугольника равна произведению проводимостей лучей звезды, примыкающих к тем же точкам, делённому на сумму проводимостей всех лучей звезды. Для частного случая, когда сопротивления лучей звезды равны, $R_{10} = R_{20} = R_{30}$ и $g_{10} = g_{20} = g_{30}$, проводимости сторон треугольника g_{12} , g_{23} и g_{31} между собой также будут равны:

$$g_{12} = \frac{g_{10}}{3}, \text{ или } g_{\Delta} = \frac{g_{\Delta}}{3},$$

т. е. проводимость ветви эквивалентного треугольника равна одной трети проводимости луча звезды.

Электролиз; законы Фарадея. Явление разложения химических сложных веществ при прохождении через них электрического тока на составные части называется электролизом, а растворы, в которых это явление имеет место, называются электролитами. При прохождении электрического тока постоянного направления через электролит происходит распад электролита на составные части, которые называются ионами. Продукт электролиза, отлагающийся на положительном электроде — аноде, называют анионом, а отлагающийся на отрицательном электроде — катоде называется катионом. Законы Фарадея гласят: *первый закон* — весовое количество вещества,

где M — весовое количество выделившегося вещества;

A — атомный вес вещества;

n — валентность вещества;

i — ток;

t — время.

Если M выражено в г, i — в а, то $C \approx 0,00001036$ и $\frac{1}{C} = 96\,500$ к.

Весовое количество вещества, выделяемое при прохождении через электролит 1 к электричества, называется электрическим эквивалентом этого вещества.

В 1837 г. русский учёный академик Борис Семёнович Якоби применил электролиз для получения рельефных отпечатков (гальванопластика). В предисловии к своей книге Якоби писал «Гальванопластика принадлежит исключительно России. Здесь она открыта, здесь и развивалась». Русское техническое общество, празднуя в 1888 г. пятидесятилетие гальванопластики, так оценило это изобретение: «В истории образованности открытие гальванопластики должно быть приравнено по своему значению к открытию книгопечатания».

Гальванический элемент называется источник электрической энергии, в котором происходит преобразование химической энергии в электрическую. Гальванические элементы состоят из разнородных электродов, погружённых в один электролит или отдельно в два разных электролита, отделённых друг от друга пористой перегородкой. Между каждым электродом и электролитом возникает электролитическая разность потенциалов, которая объясняется давлением растворения, под действием которого положительные ионы металла переходят в электролит, сообщая электролиту положительный потенциал по отношению к электроду. Для определения разности потенциалов пользуются шкалой нормальных потенциалов (табл. 5). Эта шкала даёт разность потенциалов между электродом данного металла, опущенного в нормальный раствор его соли, и платиновым электродом, опущенным в такой же раствор.

Таблица 5

Нормальные потенциалы в в

| Li | K | Na | Zn | Fe | Cd | Ni | Pb | H | Cu | Ag | Hg | Cl |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|
| -3,02 | -2,92 | -2,71 | -0,76 | -0,43 | -0,40 | -0,22 | -0,12 | 0 | +0,34 | +0,80 | +0,86 | +1,35 |

разложенного при прохождении тока, а следовательно, и весовые количества выделившихся на электродах ионов, пропорциональны количеству электричества, протекшему через электролит; *второй закон* — при одном и том же количестве электричества, прошедшем через различные электролиты, весовые количества выделившихся ионов пропорциональны их химическим эквивалентам.

Оба закона могут быть выражены одним равенством

$$M = C \frac{A}{n} it, \quad (97)$$

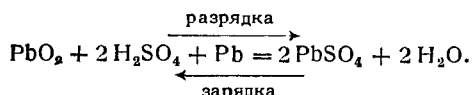
Для элемента Даниеля, состоящего из цинкового электрода, погружённого в раствор цинкового купороса, и медного электрода, погружённого в раствор медного купороса, разность потенциалов согласно таблице нормальных потенциалов будет $U = 0,34 - (-0,76) = 1,1$ в.

Аккумулятор называется вторичный элемент, в котором во время зарядки электрическая энергия превращается в химическую, а затем накопленная химическая энергия превращается во время разрядки обратно в энергию электрическую. Самыми распространёнными аккумуляторами являются свинцовые и щелочные.

Свинцовый аккумулятор состоит из двоякого рода пластин, погружённых в раствор серной кислоты: *положительные* пластины,

на которых находится пористая активная масса, состоящая из двуокиси свинца (PbO_2), тёмнокоричневого цвета, и отрицательные пластины с губчатым (пористым) металлическим свинцом на поверхности. По мере разрядки состав обеих пластин переходит в сернокислый свинец. При зарядке химическая реакция в аккумуляторе протекает в обратном направлении.

Химические реакции в свинцовом аккумуляторе при зарядке и разрядке могут быть представлены одним уравнением:



Плотность электролита по мере разрядки снижается. Э. д. с. свинцового аккумулятора порядка 2—2,2 в. При повышении температуры э. д. с. увеличивается на 0,04% на 1°C. Напряжение аккумулятора в конце разряда не следует доводить ниже 1,85 в, а в конце заряда — не выше 2,7 в. Большая разница напряжений при заряде и разряде объясняется изменением э. д. с. аккумулятора вследствие изменения концентрации электролита в порах пластин и увеличением внутреннего сопротивления аккумулятора. Максимальный разрядный ток аккумулятора зависит от поверхности пластин.

Количество электричества, которое можно взять от аккумулятора, называют ёмкостью аккумулятора:

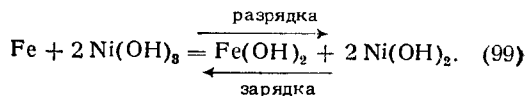
$$Q = \int_0^t idt. \quad (98)$$

Ёмкость аккумулятора измеряется в ампер-часах. Ёмкость аккумулятора изменяется в зависимости от величины разрядного тока и температуры. С увеличением разрядного тока ёмкость уменьшается, так как образующийся на внешней поверхности сернокислый свинец закрывает поры активной массы и тем самым исключает участие в химической реакции более глубоких слоёв активной массы. При понижении температуры ёмкость аккумулятора уменьшается. Отношение количества электричества, полученного при разряде, к количеству электричества, затраченного при заряде, называется коэффициентом отдачи. Коэффициент отдачи для свинцовых аккумуляторов колеблется от 0,91 до 0,96.

Коэффициент полезного действия аккумулятора равен отношению электрической энергии, полученной при разряде, к количеству электрической энергии, затраченной при заряде, который колеблется в пределах от 0,75 до 0,85.

Щелочной аккумулятор состоит из железной никелированной решётки, в промежутках которой находятся карманы (пакеты) из тонкой стали. В эти карманы закладывается активная масса, которая для положительных пластин состоит из окиси никеля с некоторой примесью графита, а для отрицательных пластин — из смеси окиси железа и окиси ртути. В качестве электролита чаще всего используется едкое кали (щёлочь).

Химическая реакция при зарядке и разрядке представляется следующим уравнением:



Напряжение аккумулятора в конце разряда не следует доводить меньше 1,15 в, напряжение в конце заряда — 1,8 в.

Коэффициент полезного действия аккумулятора колеблется в пределах 0,55 — 0,60.

Преимущества щелочных аккумуляторов заключаются в том, что при их работе не происходит вредных выделений. Щелочные аккумуляторы достаточно прочны, не боятся сотрясений и выдерживают разряд большими токами.

Контактное электричество. При соприкосновении двух разнородных металлов между ними устанавливается разность потенциалов, которая не зависит ни от формы, ни от размеров соприкасающихся проводников. Эта разность потенциалов носит название контактной разности потенциалов. Её возникновение объясняется перемещением электронов из одного металла в другой ввиду различной плотности свободных электронов (число электронов в единице объёма) в различных металлах. Свободные электроны диффундируют из одного металла в другой, в результате чего определённое количество электронов перейдёт из одного металла в другой. Металлы и другие твёрдые проводники, не разлагающиеся под действием проходящего по ним электрического тока на химически составные части, могут быть расположены в ряд Вольта, который обладает тем свойством, что всякое тело при соприкосновении с любым из тел, стоящих в этом ряду дальше, электризуется положительно, а при соприкосновении с предшествующими телами электризуется отрицательно.

Ряд Вольта: + Al, Zn, Sn, Cd, Pb, Bi, нейзильбер, латунь, Hg, Fe, сталь, Cu, Ag, Au, уголь, Ur, Te, Pt, Pi —.

Проводники, располагающиеся в ряд Вольта, обладают следующим важным свойством. Разность потенциалов, возникающая при соприкосновении двух разнородных проводников, равна сумме разностей потенциалов, возникающих при соприкосновении попарно всех проводников, помещённых в ряд Вольта между двумя крайними проводниками. Если между крайними проводниками M и N помещены проводники A и B, то

$$U_M - U_N = (U_M - U_A) + (U_A - U_B) + (U_B - U_N). \quad (100)$$

Отсюда следует, что на концах цепи, составленной из нескольких металлов, но имеющей одинаковые металлы по концам, разность потенциалов равна нулю, если все звенья цепи имеют одну температуру.

Термоэлектричество. В замкнутой цепи, состоящей из двух разнородных металлов, появляется электрический ток, если места стыка разнородных металлов будут иметь разные температуры. Э. д. с., вызывающая этот ток, называется термоэлектром-

движущей силой. Цепь, составленная из двух разнородных металлов, называется термопарой. Соединение разнородных металлов между собой может быть произведено нажатием, скруткой, сваркой или при помощи спаев. В цепи, состоящей из однородного металла, при любом распределении температур термоэлектродвижущей силы не возникает. В цепи, состоящей из разнородных металлов, термоэлектродвижущей силы не возникает, если все места спаев находятся в условиях одинаковой температуры. Величина термоэлектродвижущей силы зависит от металлов, образующих термопару, от температуры мест соединения и не зависит от длины звеньев, от способа их соединения и от распределения температуры по длине звена. Природа появления термоэлектродвижущей силы та же, что и природа появления контактной разности потенциалов, и объясняется различной плотностью свободных электронов в металлах. В термопаре имеет место непосредственное преобразование тепловой энергии в электрическую без промежуточного тела, какими являются вода и водяной пар. Однако коэффициент полезного действия этого преобразования весьма низок (1—3%) и экономически оно не оправдывается. Многочисленные попытки создать термопару с высоким коэффициентом полезного действия к положительным результатам пока не привели. При небольшой разности температур спаев величина термоэлектродвижущей силы определяется по закону

$$e = a(t_1 - t_2), \quad (101)$$

где a — коэффициент, характеризующий металлы термопары;

$t_1 - t_2$ — разность температур спаев.

Все металлы могут быть расположены в нижеприводимый термоэлектрический ряд таким образом, что термоэлектрический ток, возникающий в замкнутой цепи, составленной из двух металлов этого ряда, имеет направление через более нагретое соединение от металла, стоящего ближе к началу ряда, к металлу, стоящему ближе к концу: — Na, K, Bi, Ni, Co, Pd, Hg, Pt, Au, Cu, Sn, Al, Pb, Zn, Ag, Cd, Fe, Sb +.

Термоэлектродвижущие силы используют для измерения температур. Спай помещают в то место, температуру которого требуется измерить, а два других конца присоединяют медными проводами к гальванометру. Для сравнительно низких температур (—50 ÷ +500°C) весьма подходящей является термопара константан—медь, дающая около $40 \cdot 10^{-6}$ в/°C, или константан—железо, дающая около $55 \cdot 10^{-6}$ в/°C. Для измерения температур до 1600°C применяют термопару, состоящую из 90% платины и 10% родия, дающую около $10 \cdot 10^{-6}$ в/°C. Градуировку термопар производят по точкам кипения и плавления определённых элементов. Термопару или термоэлемент иногда применяют для измерения весьма малых значений электрического тока.

Электрический ток в вакууме. В идеальном вакууме отсутствует какое-либо весовое вещество. Однако в вакууме возможно про-

хождение электрического тока, которое происходит за счёт тех электронов, которые выделяются металлическими электродами. Свободные электроны в металле обладают кинетической энергией, равной $\frac{1}{2} m_0 v_0^2$.

Они удерживаются в металле силами поля. В некоторых случаях кинетическая энергия свободного электрона становится больше, чем так называемая работа выхода, и электрон вылетает из металла. Эмиссия (вылет) электронов при обыкновенных температурах, называемая холодной эмиссией, ничтожно мала. Значительно большая эмиссия электронов металлами получается при так называемой термоэлектронной эмиссии, когда металл накалён. С повышением температуры металла скорость электронов увеличивается, электроны приобретают большую кинетическую энергию, достаточную для преодоления работы выхода, и эмиссия электронов начинается при сравнительно слабых электрических полях. Принцип термоэлектронной эмиссии используется в электронных лампах.

Фотоэлектричество. Фотоэлектрическое явление происходит при поглощении атомами вещества лучистой энергии и состоит в том, что поток световой энергии вырывает из металла электроны. Выведение электрона из данного металла начинается лишь с определённой частоты световых волн f_0 , называемой порогом фотоэффекта. Порог фотоэффекта зависит от вещества освещаемого тела. Порог в видимой части спектра имеют щелочные металлы (литий, натрий, калий, рубидий). Скорость, приобретаемая электронами при фотоэффекте, зависит лишь от длины световых волн, но не от интенсивности освещения. От интенсивности освещения зависит число электронов, отрываемых от атомов в единицу времени. Фотоэффект может происходить и на поверхности тела (поверхностный, или внешний эффект), и внутри него (объёмный, или внутренних эффект). Приборы, в которых происходит преобразование лучистой энергии в электрическую, называются фотоэлементами.

Изобретателем фотоэлемента является великий русский физик Александр Григорьевич Столетов (1839—1896 гг.), который писал: «Система цинк — серебро — воздух при условии освещения серебра активными лучами временно обращается в настоящий гальванический элемент, в котором роль жидкости играет газовая среда».

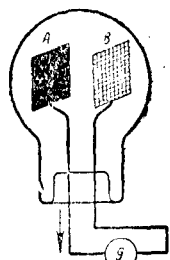
В представленном на фиг. 8 вакуумном фотоэлементе с внешним фотоэффектом световой поток падает на металлическую пластинку А и вырывает из неё электроны. Если электрон имеет достаточную кинетическую энергию, он доходит до пластинки В и в случае замкнутой цепи по гальванометру пройдёт ток. К. п. д. такого фотоэлемента весьма мал. Если между пластинками фотоэлемента создать электрическое поле (фиг. 9), чтобы оно подхватывало все отрываемые светом от пластинки электроны и отводило их к пластинке В, то мы получим ток насыщения I , который будет пропорционален величине светового потока F , па-

дающего на поверхность освещаемой пластинки:

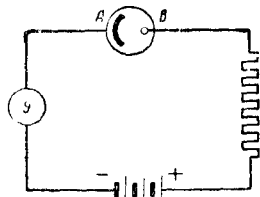
$$I = kF;$$

k зависит от материала, способа приготовления, формы пластинки и от спектрального состава падающего света.

При объёмном фотоэффекте, который особенно сильно проявляется у селена, лучистая энергия, особенно красный и жёлтый цвет, проникая в тело вещества, отделяет электроны от атомов, в силу чего увеличи-



Фиг. 3. Фотоэлемент



Фиг. 9. Схема фотоэлемента

вается число свободных электронов и тем самым увеличивается электропроводность селена. Современные фотоэлементы выполняются в виде стеклянных баллонов, в которых светочувствительный слой наносится на внутренней поверхности баллона. Свет падает через неприкрытую часть (окошко) баллона. Другим электродом служит помещённое внутри баллона кольцо, имеющее, так же как и светочувствительный слой, вывод из баллона.

В цезиевых фотоэлементах светочувствительный слой состоит из слоя окиси серебра, на который наносится слой окиси металлического цезия. Для увеличения светочувствительности баллон заполняется инертным газом (аргоном или неон), который вследствие ионизации электронами, выходящими из светочувствительного слоя, даёт дополнительное число свободных электронов. В таких фотоэлементах токи насыщения пропорциональны световому потоку и дают в случае вакуумных фотоэлементов 10—80 мка на 1 лм, а в случае наполнения газом — до 500 мка на 1 лм.

Электропроводность газов. Газы являются диэлектриками, но при известных условиях через газы может устанавливаться непрерывное перемещение электрических зарядов (электрический ток); электрическая проводимость газов может быть достигнута за счёт ионизаторов. В качестве ионизатора может быть поток электронов, испускаемый накалившимся телом, высокая температура, ультрафиолетовые, рентгеновские и космические лучи. В некоторых случаях газы получают электропроводность под действием сильных электрических полей. Под действием электрического поля имеющиеся в газе ионы перемещаются: положительные по направлению поля, отрицательные в обратном направлении. Дойдя до электродов, ионы превращаются в нейтральные молекулы. Для того чтобы ток в газовой среде постоянно существовал, необходимо непрерывное образование новых ионов, осуществляемое ионизаторами.

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Переменным током в широком смысле этого слова называется ток, который изменяет свою величину в зависимости от времени. В электротехнике обыкновенно приходится иметь дело с периодическими переменными токами, т. е. токами, которые через определённые промежутки времени изменяют своё направление и величину.

Периодом переменного тока называется время T , в течение которого ток или э. д. с. совершает полный цикл своего изменения.

Частотой переменного тока называется число периодов в единицу времени. Частота измеряется в герцах. Частота равна 1 гц, когда в 1 сек. совершается один период:

$$f = \frac{1}{T}; fT = 1. \quad (102)$$

Частота переменного тока зависит от числа оборотов n и числа пар полюсов p генератора, вырабатывающего переменную э. д. с.:

$$f = \frac{pn}{60}, \quad (103)$$

где n — число оборотов в 1 мин.

Угловая частота переменного тока ω равна

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \quad (104)$$

В качестве стандартной частоты в СССР установлена частота в 50 гц. Соответствующая этой частоте угловая частота

$$\omega = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ сек}^{-1}.$$

Переменный ток, изменяющийся по закону синуса, называется переменным синусоидально изменяющимся током (гармоническим). Значение переменного тока или э. д. с. для каждого значения времени называется мгновенным значением и обозначается соответственно i или e . Наибольшее значение переменного тока или э. д. с., которое переменный ток принимает в течение одного периода (один раз положительное, другой раз отрицательное), называется амплитудой или максимальным значением и обозначается E_m и I_m :

$$i = I_m \sin \omega t;$$

$$e = E_m \sin \omega t.$$

Изображение переменных токов. Переменные токи, напряжения и э. д. с., изменяющиеся по закону синуса, могут быть изображены графически: а) в прямоугольных осях координат, откладывая по оси абсцисс углы, а по оси ординат — значения переменных величин; такие диаграммы называются линейными или волновыми; б) в полярных координатах в виде вектора, равного в определённом масштабе амплитуде этой

величины, который воображается вращающимся против часовой стрелки с равномерной угловой скоростью, равной угловой частоте около некоторого центра, так, что угол, который составляется этим вектором, равен фазовому углу $\alpha = \omega t$. Такие диаграммы называются векторными.

Действующее, или эффективное, значение переменного тока равно значению такого постоянного тока, который, проходя через то же сопротивление, что и переменный ток, выделяет за одно и то же время такое же количество тепла. Действующее, или эффективное, значение тока и э. д. с. I и E любой формы

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt};$$

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt}. \quad (105)$$

Для синусоидального переменного тока

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m;$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0,707 E_m. \quad (106)$$

Среднее значение тока и э. д. с. за целый период равно нулю. Среднее значение тока и э. д. с. за полупериод

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i dt;$$

$$E_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} e dt. \quad (107)$$

Для переменного синусоидально изменяющегося тока

$$I_{cp} = 0,637 I_m; E_{cp} = 0,637 E_m. \quad (108)$$

Поверхностный эффект. Постоянный ток равномерно распределяется по всему сечению проводника, т. е. плотность тока в любом сечении проводника имеет одно и то же значение. В противоположность этому при переменном токе плотность тока в разных сечениях проводника неодинакова. Это происходит оттого, что образующееся вокруг проводника переменное магнитное поле наводит в отдельных нитях (разделенным на которые можно себе представить проводник) неодинаковые э. д. с. самоиндукции.

Нити, которые находятся в центре сечения проводника, сцепляются с большим магнитным потоком, а нити, лежащие на поверхности проводника, — с меньшим. В силу этого э. д. с. самоиндукции в центральных нитях проводника больше, а на поверхности меньше. Поэтому плотность тока в центре проводника меньше, а ближе

к поверхности проводника больше. В результате этого потери на нагревание в проводнике при переменном токе больше, нежели в том же самом проводнике при постоянном токе. Это явление вытеснения тока на поверхность проводника носит название **поверхностного эффекта**. Поверхностный эффект особенно резко проявляется в проводах большого сечения и при высокой частоте.

Активное сопротивление. При явлении поверхностного эффекта происходит как бы увеличение сопротивления. Отношение потерь на нагревание в проводнике к квадрату эффективного тока называют активным сопротивлением:

$$R = \frac{P}{I^2}.$$

Активное сопротивление больше сопротивления при постоянном токе, которое учитывается по формуле

$$R_{ном} = \rho \frac{l}{S}.$$

Для цилиндрических проводников при невысоких частотах

$$\frac{R}{R_{ном}} = 1 + \frac{\pi^4 f^2 d^4 \mu_r^2}{48 \rho^2 \cdot 10^{18}}; \quad (109)$$

при больших частотах

$$\frac{R}{R_{ном}} = \frac{\pi d}{2} \sqrt{\frac{\mu_r f}{\rho \cdot 10^9}}, \quad (110)$$

где R — активное сопротивление;
 $R_{ном}$ — сопротивление постоянному току;
 f — частота переменного тока;
 d — диаметр провода в см;
 ρ — удельное сопротивление, отнесенное к 1 см длины и 1 см² поперечного сечения (для меди $\rho = 175 \cdot 10^{-8}$);
 μ_r — магнитная проницаемость.

Отношения активного сопротивления к сопротивлению при постоянном токе для медных проводов, в зависимости от произведения частоты на квадрат диаметра провода указаны в табл. 6.

Таблица 6

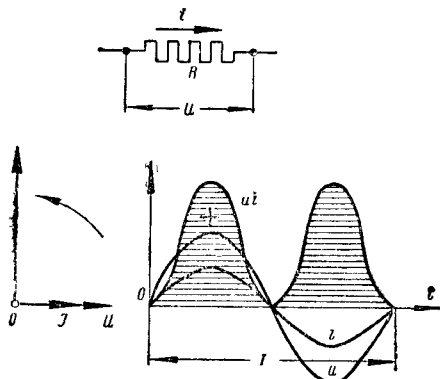
| fd^2 | $\frac{R}{R_{ном}}$ | fd^2 | $\frac{R}{R_{ном}}$ | fd^2 | $\frac{R}{R_{ном}}$ |
|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|
| 180 | 1,0258 | 980 | 1,4920 | 2 400 | 2,4930 |
| 320 | 1,0805 | 1 280 | 1,6778 | 2 800 | 2,3937 |
| 500 | 1,1747 | 1 620 | 1,8628 | 5 120 | 3,0956 |
| 720 | 1,3180 | — | — | 8 000 | 3,7940 |

Явление поверхностного эффекта имеет место и в проводниках машин и трансформаторов.

Увеличение активного сопротивления в машинах и трансформаторах гораздо больше, чем в отдельных проводниках, вследствие того, что неравномерность распределения тока по сечению проводника вызывается не только потоком данного проводника, но и магнитными потоками соседних проводников.

Цепь с активным сопротивлением. При прохождении переменного тока через активное сопротивление или, как иногда говорят, через сопротивление, имеют место следующие основные соотношения.

1. Ток совпадает по фазе с приложенным к цепи напряжением (фиг. 10), где представ-



Фиг. 10. Схема, векторная и линейная диаграммы цепи с активным сопротивлением

лены линейная и векторная диаграммы тока и напряжения. Если напряжение изменяется по закону

$$u = U_m \sin \omega t,$$

то ток изменяется по закону

$$i = I_m \sin \omega t.$$

2. В каждый отдельный момент времени ток равен напряжению, делённому на сопротивление цепи R

$$i = \frac{u}{R}; \quad i = \frac{U_m}{R} \sin \omega t.$$

3. Максимальное значение тока равно максимальному напряжению, делённому на сопротивление

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

4. Эффективное значение тока I равно эффективному напряжению U , делённому на сопротивление

$$I = \frac{U}{R}.$$

5. Мощность переменного тока равна произведению действующих значений тока и напряжения:

$$P = UI, \text{ или } P = I^2 R.$$

Цепь с индуктивностью L . Когда электрический ток проходит по катушке с индуктивностью и сопротивлением, то в катушке образуется магнитное силовое поле. Если ток в катушке будет изменяться по времени, то меняющийся магнитный поток будет наводить в катушке э. д. с. самоиндукции.

Величина э. д. с. самоиндукции равна

$$e_L = -w \frac{d\Phi}{dt} \text{ в.}$$

Если магнитный поток будет изменяться по закону синуса

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t,$$

то величина э. д. с. самоиндукции в каждый отдельный момент времени будет определяться равенством:

$$e_L = -w \frac{d\Phi}{dt} = -w \Phi_m \omega \cos \omega t = w \Phi_m \omega \sin (\omega t - 90^\circ),$$

т. е. э. д. с. самоиндукции отстаёт от наводящего её магнитного потока на угол 90° . Векторная и линейная диаграммы для этого случая представлены на фиг. 11.

Максимальное значение э. д. с. самоиндукции будет

$$E_{Lm} = w \Phi_m \omega.$$

Так как

$$\omega = 2\pi f,$$

то

$$E_{Lm} = 2\pi f w \Phi_m.$$

Эффективное значение э. д. с. самоиндукции

$$E_L = \frac{E_{Lm}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w \Phi_m = 4,44 f w \Phi_m. \quad (111)$$

Другое выражение величины э. д. с. самоиндукции может быть получено следующим образом:

$$e_L = -L \frac{di}{dt}.$$

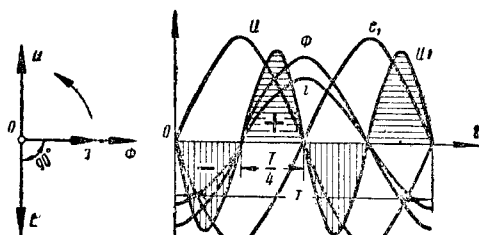
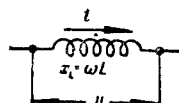
Если ток изменяется по закону синуса:

$$i = I_m \sin \omega t,$$

то

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L I_m \omega \cos \omega t = L I_m \omega \sin (\omega t - 90^\circ),$$

т. е. э. д. с. самоиндукции отстаёт от тока на угол 90° .



Фиг. 11. Схема, векторная и линейная диаграммы цепи с индуктивностью

Величина максимальной э. д. с. самоиндукции будет

$$E_{Lm} = L I_m \omega.$$

Эффективное значение э. д. с. самоиндукции

$$E_L = L I \omega.$$

Если катушка имеет сопротивление $R \neq 0$, то подведённое напряжение покрывает э. д. с. самоиндукции:

$$U = U_L = -e_L;$$

$$U_L = -[L I_m \omega \sin(\omega t - 90^\circ)] = \\ = L I_m \omega \sin(\omega t + 90^\circ),$$

т. е. ток в индуктивной катушке отстаёт от приложенного напряжения на угол 90° (фиг. 11).

Величина тока в индуктивной катушке

$$I = \frac{U}{L\omega} = \frac{U}{X_L},$$

где $L\omega = X_L$ — реактивное сопротивление индуктивности, или реактанс индуктивности.

Реактивное сопротивление индуктивности измеряется в омах, если индуктивность L подставить в генри.

ω — угловая частота переменного тока.

Мощность, затрачиваемая в индуктивной катушке, равна нулю, так как при возрастании тока от нуля до I_m в катушке запасается энергия, а при уменьшении тока от I_m до нуля такое же количество энергии возвращается обратно.

Энергия, запасаемая в катушке в виде энергии электромагнитного поля, равна

$$W = \int_0^{I_m} u i dt = \int_0^{I_m} L \frac{di}{dt} \cdot i dt = \\ = \int_0^{I_m} L i di = L \frac{I_m^2}{2}. \quad (112)$$

Цепь с ёмкостью C . Если конденсатор с ёмкостью C присоединён к источнику тока с напряжением U , то на обкладках конденсатора собираются электрические заряды (конденсатор заряжается).

Количество электричества, запасаемое в конденсаторе

$$Q = CU.$$

Если конденсатор приключён к источнику тока с переменным напряжением

$$u = U_m \sin \omega t,$$

то с изменением напряжения изменяется и количество электричества, запасаемое в конденсаторе

$$dQ = C du.$$

Поэтому при включении конденсатора на переменное синусоидально изменяющееся напряжение в проводах всё время будет иметь место перетекание зарядов, а следовательно, и тока:

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{du}{dt} = CU_m \omega \cos \omega t = \\ = CU_m \omega \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Таким образом, ток в цепи конденсатора опережает приложенное к цепи напряжение на угол 90° . Векторная и линейная диаграммы для этого случая представлены на фиг. 12.

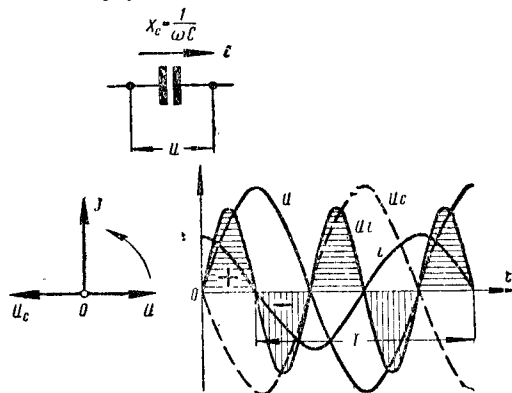
Максимальное значение тока в цепи конденсатора

$$I_m = CU_m \omega,$$

или

$$I_m = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U_m}{X_c},$$

где $\frac{1}{\omega C} = X_c$ называется реактансом ёмкости и измеряется в омах. Ёмкость в выражении реактанса ёмкости подставляется в фарадах.



Фиг. 12. Схема, векторная и линейная диаграммы цепи с ёмкостью

Для эффективного значения тока

$$I = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U}{X_c}.$$

Мощность, затрачиваемая в цепи ёмкости, равна нулю, так как за время увеличения напряжения от нуля до U_m конденсатор потребляет от источника часть энергии (заряжается), а за время уменьшения напряжения от U_m до нуля конденсатор разряжается и отдаёт энергию обратно источнику тока. Энергия, запасаемая конденсатором при заряде, равна

$$W = \int_0^{U_m} u i dt = C \frac{U_m^2}{2}. \quad (113)$$

Последовательное соединение активного сопротивления и индуктивности. В индуктивных катушках сопротивление каждого витка составляет часть всего сопротивления. Индуктированная во всей катушке э. д. с. составляется из э. д. с. отдельных витков. Поэтому схематически индуктивную катушку можно представить двумя сопротивлениями — активным и реактивным, включёнными последовательно.

При прохождении через катушку переменного синусоидально изменяющегося тока приложенное к катушке напряжение в каждый момент времени разбивается на два слагающих:

$$U = iR + L \frac{di}{dt}.$$

Слагающая $iR = U_a$ совпадает по фазе с током, так как представляет падение напряжения в активном сопротивлении.

Слагающая

$$L \frac{di}{dt} = LI \omega = U_L$$

опережает ток на угол 90° , так как представляет компенсирующую э. д. с. самоиндукции. Поэтому полное подведённое напряжение будет равно геометрической сумме падений напряжений:

$$\bar{U} = \bar{U}_a + \bar{U}_L^*,$$

или

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L)^2} = I \sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

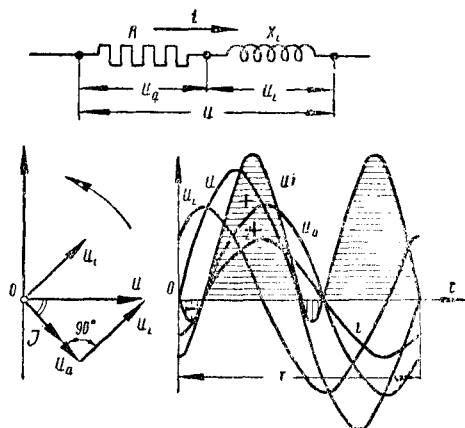
Полное, или кажущееся, сопротивление цепи

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

Ток в индуктивной катушке не совпадает по фазе с напряжением, а отстаёт на угол φ :

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X_L}{Z}.$$

Волновая и векторная диаграммы и схема соединений индуктивной катушки приведены на фиг. 13.



Фиг. 13. Схема, векторная и линейная диаграммы последовательной цепи с активным сопротивлением и индуктивностью

Мощность, затрачиваемая в индуктивной катушке

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R.$$

Активным током называется слагающая тока, которая совпадает по фазе с напряжением:

$$I_a = I \cos \varphi.$$

Реактивным током называется слагающая тока, которая отстаёт по фазе от напряжения на угол 90° :

* Следует иметь в виду, что мгновенные значения синусоидальных величин складываются алгебраически, а максимальные и эффективные значения этих величин, поскольку они являются вращающимися векторами (см. выше), — геометрически.

$$I_r = I \sin \varphi.$$

Величина, обратная полному сопротивлению, называется полной проводимостью и измеряется в сименсах:

$$Y = \frac{1}{Z}.$$

Исходя из понятий активной и реактивной слагающих тока, в технике переменных токов вводят понятия активной и реактивной проводимости:

$$I_a = I \cos \varphi = \frac{U}{Z} \cdot \frac{R}{Z} = U \frac{R}{Z^2} = Ug.$$

Величина $\frac{R}{Z^2} = g$ называется активной проводимостью:

$$I_r = I \sin \varphi = \frac{U}{Z} \cdot \frac{X_L}{Z} = U \frac{X_L}{Z^2} = Ub.$$

Величина $\frac{X_L}{Z^2} = b_L$ называется индуктивной проводимостью.

Величина $\frac{X_C}{Z^2} = b_C$ называется ёмкостной проводимостью. Величина $\frac{X_L - X_C}{Z^2} = b_L - b_C = b$ называется реактивной проводимостью.

Последовательное соединение активного сопротивления и конденсатора. В цепи, состоящей из последовательного соединения активного сопротивления и ёмкости, полное подведённое напряжение в каждый момент времени распадается на две составляющие:

$$U = U_a + U_c = iR + \frac{1}{C} \int i dt.$$

Составляющая U_a представляет падение напряжения в активном сопротивлении и совпадает по фазе с током.

Составляющая U_c представляет компенсирующее напряжение на зажимах конденсатора и отстаёт от тока на угол 90° .

Полное падение напряжения будет равно геометрической сумме падений напряжения на отдельных участках:

$$\bar{U} = \bar{U}_a + \bar{U}_c,$$

или

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_c^2} = \sqrt{(IR)^2 + (IX_C)^2} = I \sqrt{R^2 + X_C^2}.$$

Полное, или кажущееся, сопротивление цепи

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_C^2}.$$

Схема соединений, волновая и векторная диаграммы приведены на фиг. 14.

Вектор тока опережает напряжение на угол φ :

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{-X_C}{Z}.$$

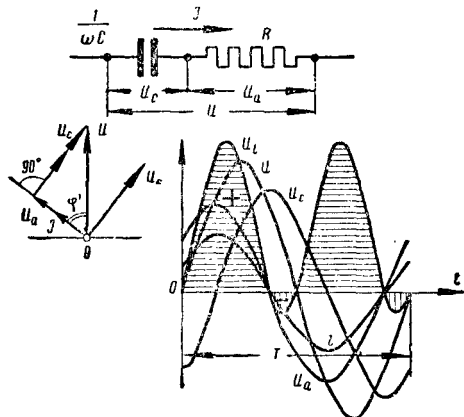
Знак минус перед X_C условимся ставить везде для того, чтобы отличать активно-индуктивную цепь от активно-ёмкостной.

Отрицательное значение $\sin \varphi$ характеризует опережение током напряжения, по-

положительное значение $\sin \varphi$ — отставание тока от напряжения.

Мощность в цепи равна произведению эффективных значений тока, напряжения и коэффициента мощности $\cos \varphi$:

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R.$$



Фиг. 14. Схема, векторная и линейная диаграммы последовательной цепи с активным сопротивлением и ёмкостью

Последовательное соединение активного сопротивления, индуктивной катушки и конденсатора. В цепи с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивной катушки и конденсатора приложенное напряжение распадается на три составляющих:

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = U_a + U_L + U_c,$$

где iR — падение напряжения в активном сопротивлении;

$L \frac{di}{dt}$ — компенсирующая э. д. с. самоиндукции;

$\frac{1}{C} \int idt$ — компенсирующая напряжение на конденсаторе.

Полное подведённое напряжение равно геометрической сумме отдельных падений напряжения:

$$\bar{U} = \bar{U}_a + \bar{U}_L + \bar{U}_c.$$

Схема и векторная диаграмма рассматриваемой цепи представлены на фиг. 15, из которой следует, что

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_c)^2} = \\ &= \sqrt{(IR)^2 + (IX_L - IX_c)^2} = \\ &= I \sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2}. \end{aligned}$$

Ток в цепи будет:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2}}.$$

Вектор тока по отношению к вектору напряжения может: а) отставать, когда $X_L > X_c$; б) опережать, когда $X_L < X_c$; в) совпадать по фазе с напряжением, когда $X_L = X_c$.

Угол сдвига фаз между током и напряжением зависит от составляющих цепь сопротивлений:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X_L - X_c}{Z}.$$

Значение $\sin \varphi$ может быть положительным и отрицательным в зависимости от величин X_L и X_c .

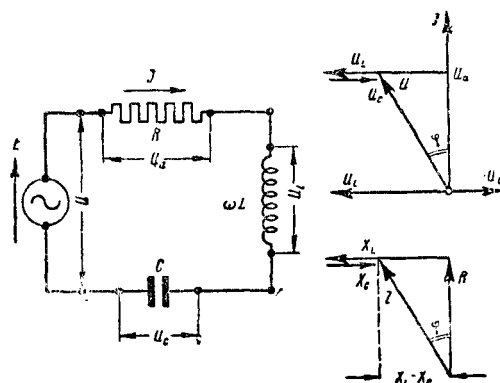
Резонанс напряжений. В цепи, состоящей из активного сопротивления, индуктивности и ёмкости, векторы падений напряжения в индуктивности и ёмкости направлены в разные стороны и могут частично или полностью компенсировать друг друга. Особенно характерно такое состояние, когда имеет место полная компенсация, т. е.

$$IX_L = IX_c,$$

или

$$X_L = X_c, \quad X = 0.$$

Явление, когда сопротивление индуктивности равно сопротивлению ёмкости, называется резонансом напряжений.



Фиг. 15. Схема и векторная диаграмма последовательной цепи активного сопротивления, индуктивности и ёмкости

Частота, при которой в данной цепи наступает резонанс, называется резонансной частотой:

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (114)$$

При резонансе напряжений реакции ёмкости и индуктивности взаимно компенсируются; поэтому величина тока зависит только от величины сопротивления:

$$Z = R; \quad I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R} = \max.$$

Значение тока при резонансе напряжений достигает максимальной величины, несмотря на весьма большие значения сопротивлений X_L и X_c .

При резонансе напряжение на зажимах ёмкости и индуктивности может очень сильно повыситься (если R мало), так как ток в момент резонанса получает наибольшее значение.

Угол сдвига фаз между током и напряжением в момент резонанса равен нулю

$\cos \varphi = 1$. Поэтому мощность, потребляемая в цепи:

$$P = UI \cos \varphi = UI.$$

Реактивный ток в момент резонанса равен нулю.

В радиотехнике явление резонанса искусственно создается за счёт переменной индуктивности или же за счёт изменения ёмкости.

Для определения длины волны, на которую настроен приёмник, пользуются следующими соотношениями:

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}};$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (115)$$

Длина волны определяется по скорости распространения энергии электромагнитных волн, равной скорости света:

$$V_0 = 300\,000 \text{ км/сек.}$$

Длина волны

$$\lambda = \frac{v_0}{f} = 2\pi V_0 \sqrt{LC}. \quad (116)$$

Резонанс токов имеет место при параллельном соединении приёмников электрической энергии, когда в ряде цепей имеется реактивная проводимость индуктивности, а в других—реактивная проводимость ёмкости.

Резонанс токов характеризуется тем, что общий ток цепи совпадает по фазе с напряжением. Это наступает тогда, когда реактивный ток индуктивных цепей равен по величине реактивному току ёмкостных цепей:

$$\sum I_r = 0.$$

В момент резонанса токов алгебраическая сумма реактивных проводимостей равна нулю:

$$\sum b = 0.$$

Резонанс токов используется в настоящее время очень широко для целей улучшения коэффициента мощности фабрично-заводских установок. Это достигается за счёт параллельного присоединения к электродвигателям конденсаторов определённой ёмкости.

При резонансе токов имеют место следующие соотношения:

а) угол сдвига фаз между полным током¹ и напряжением равен нулю, $\cos \varphi = 1$;

б) полный ток в момент резонанса токов получает минимальное значение при отсутствии активного сопротивления в цепи ёмкости;

в) активная мощность в цепи равна произведению эффективных значений неразветвлённого тока и напряжения:

$$P = UI.$$

Символический метод даёт возможность в весьма простой форме устанавливать соотношения между напряжениями и токами в случае их синусоидального изменения, применяя законы Ома и Кирхгофа в том же виде, как и для постоянного тока. Мгновенные значения изменяющейся в зависимости от времени по закону синуса величины определяются через проекции на определённую

ось соответствующего вектора, вращающегося с равномерной угловой скоростью ω около центра, составляющего с начальной линией угол $\alpha = \omega t$. Такой вращающийся вектор может быть представлен в трёх видах:

$$A = a + jb;$$

$$A = Ae^{j\omega t};$$

$$\dot{A} = A(\cos \omega t + j \sin \omega t),$$

где \dot{A} —модуль вектора, равный $\sqrt{a^2+b^2}$;

$j = \sqrt{-1}$ —мнимая величина;

e —основание натуральных логарифмов;

ωt —угол поворота вектора.

Закон Ома. Если неразветвлённая цепь состоит из ряда последовательно соединённых сопротивлений

$$Z_1 = r_1 + jx_1 = Z_1 e^{j\varphi_1},$$

$$Z_2 = r_2 + jx_2 = Z_2 e^{j\varphi_2};$$

если в цепи действует несколько э. д. с.

$$\dot{E}_1 = E'_1 + jE''_1 = E_1 e^{j\alpha_1},$$

$$\dot{E}_2 = E'_2 + jE''_2 = E_2 e^{j\alpha_2},$$

то ток в цепи по величине и фазе определится как отношение суммы комплексных значений э. д. с. к сумме комплексных значений сопротивлений:

$$i = \frac{\dot{E}_1 + \dot{E}_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(E'_1 + E'_2) + j(E''_1 + E''_2)}{(r_1 + r_2) + j(x_1 + x_2)}. \quad (117)$$

Первый закон Кирхгофа. Если к узлу тока подходят токи $\dot{I} = I'_1 + jI''_1$; $\dot{I}_2 = I'_2 + jI''_2$, а уходит ток \dot{I} , то сумма комплексных значений токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 равна \dot{I} :

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = (I'_1 + I'_2) + j(I''_1 + I''_2),$$

в каждой точке цепи алгебраическая сумма всех действительных и всех мнимых составляющих токов равна нулю.

Второй закон Кирхгофа. В замкнутом контуре сумма комплексных значений э. д. с. равна сумме комплексных значений падений напряжений в отдельных участках цепи:

$$\sum \dot{E} = \sum i Z.$$

На основании второго закона Кирхгофа сложная цепь, состоящая из нескольких параллельных ветвей, может быть заменена одним эквивалентным сопротивлением:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \dots + \frac{1}{Z_n}.$$

Для случая двух параллельных ветвей

$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

Определение мощности по комплексным значениям тока и напряжения. Пусть комплексное выражение тока есть

$$\dot{I} = I' + jI'' = I e^{j\beta}$$

и пусть

$$\dot{I}^* = I' - jI'' = I e^{-j\beta};$$

\dot{I} и \dot{I}^* называются взаимно сопряжёнными комплексными числами.

¹ Ток по разветвлению.

Образует новое комплексное число

$$\dot{P}_i = \dot{U} \dot{I}^*,$$

которое назовём комплексной мощностью.
Если

$$\dot{U} = U e^{j\alpha},$$

то

$$\dot{P}_i = \dot{U} \dot{I}^* e^{j(\alpha-\beta)} = U I e^{j\varphi} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P_a + jP_r, \quad (118)$$

т. е. действительная часть P_i^* равна активной мощности P_a (или P), мнимая часть \dot{P}_i равна реактивной мощности \dot{P}_r (или Q), а модуль \dot{P}_i равен

$$|P| = P_i = UI = S,$$

т. е. равен так называемой кажущейся мощности.

Нахождение распределения токов в сложных цепях переменного тока символическим методом. Законы Ома и Кирхгофа для цепей переменного тока в символической форме составляются так же, как и для цепей постоянного тока. Поэтому для нахождения распределения токов в сложных цепях переменного тока могут быть применены те же методы и способы, которыми пользуются в цепях постоянного тока, т. е. уравнения Кирхгофа, метод суперпозиции, метод холостого хода и короткого замыкания, метод трансформации, изложенные ранее.

Многофазные системы. Многофазной системой переменного тока называется такая система, в которой действуют несколько э. д. с. одинаковой частоты, но сдвинуты по фазам на определённые углы.

Симметричной многофазной называется такая система, в которой во всех фазах действуют э. д. с. одной и той же величины, причём э. д. с. сдвинуты относительно друг друга на одинаковые углы.

Из всех многофазных систем наибольшее распространение получила система трёхфазного тока, предложенная Доливо-Добровольским, т. е. такая система, когда в цепи действуют три э. д. с., сдвинутые друг от друга на угол 120° :

$$e_1 = E_m \sin \omega t;$$

$$e_2 = E_m \sin (\omega t - 120^\circ);$$

$$e_3 = E_m \sin (\omega t - 240^\circ).$$

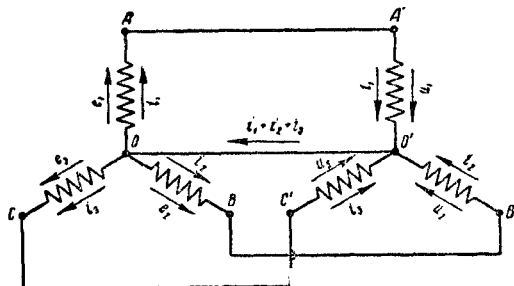
Соединение в звезду. Соединением трёхфазной системы в звезду (фиг. 16) называется такое соединение, когда три «одноимённые» точки трёх обмоток соединяются в одну общую точку, а от трёх других точек электрическая энергия отводится к потребителю.

Общая точка трёх обмоток называется нулевой или нейтральной точкой; провод, отходящий от этой точки, называется нулевым или нейтральным проводом. Ток нулевого провода I_0 равен геометрической сумме линейных токов. Линейное напряжение при соединении в звезду равно геометрической разности двух фазовых напряжений.

При соединении в звезду симметричной системы линейное или междупазовое напряжение в $\sqrt{3}$ раз больше фазового напря-

жения. Линейный ток при соединении в звезду равен фазовому току.

При симметричной нагрузке, соединённой в звезду, ток в нулевом проводе равен нулю.



Фиг. 16. Схема соединения в звезду

Сумма токов в трёх проводах линии при симметричной нагрузке равна нулю:

$$i_1 + i_2 + i_3 = I_m \sin \omega t + I_m \sin (\omega t - 120^\circ) + I_m \sin (\omega t - 240^\circ) = 0.$$

Соединение треугольником. Схемой соединения треугольником называется такая схема, когда попарно соединяются между собой разноимённые концы разных фаз (фиг. 17).

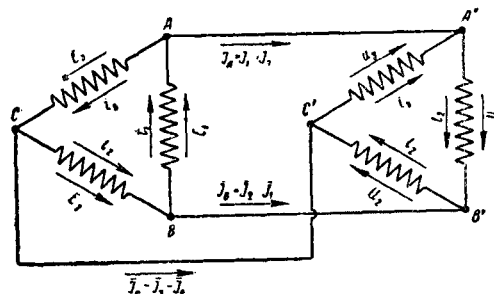
В случае симметричной трёхфазной системы, соединённой треугольником, имеют место следующие соотношения:

а) линейный ток в $\sqrt{3}$ раз больше фазового тока:

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi;$$

б) линейное напряжение равно фазовому напряжению:

$$U_L = U_\phi;$$



Фиг. 17. Схема соединения в треугольник

в) сумма трёх линейных токов в каждый отдельный момент времени равна нулю:

$$i_{1L} + i_{2L} + i_{3L} = 0.$$

Мощность симметричной трёхфазной системы. Мощность трёхфазной системы равна сумме мощностей в отдельных фазах:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1; \quad P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2;$$

$$P_3 = U_3 I_3 \cos \varphi_3;$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

При симметричной системе

$$U_1 = U_2 = U_3; \quad I_1 = I_2 = I_3; \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$$

Поэтому мощность симметричной трёхфазной системы

$$P = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi, \quad (119)$$

где φ — угол сдвига фаз между фазовым током и фазовым напряжением.

Так как для звезды

$$U_L = \sqrt{3} U_{\phi},$$

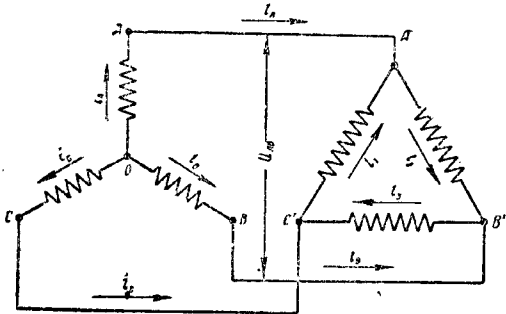
а для треугольника

$$I_L = \sqrt{3} I_{\phi},$$

то мощность трёхфазной симметричной системы для схемы звезды и для схемы треугольника будет выражаться одной формулой:

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi. \quad (120)$$

Смешанные соединения. Иногда встречаются схемы, в которых потребитель соединён в треугольник, а генератор в звезду (или наоборот) (фиг. 18). Такие схемы соединения называют смешанными. Трансфигурируя схему треугольник в эквивалентную звезду, можно свести смешанную систему к схеме звезды. Правила трансфигурации схемы звез-



Фиг. 18. Соединение генератора звездой и нагрузки треугольником

ды в эквивалентную схему треугольника (и наоборот) рассмотрены были ранее.

Разложение несимметричной трёхфазной системы на две симметричные. Любая несимметричная трёхфазная система, сумма векторов которой равна нулю, может быть разложена на две симметричные трёхфазные системы, имеющие разные амплитуды. При этом одна система имеет тот же порядок следования фаз во времени, что и несимметричная система, и называется системой прямой последовательности. Другая система имеет обратный порядок следования фаз во времени и называется системой обратной последовательности.

Степень несимметрии системы определяется отношением величин векторов обратной и прямой последовательности. Для источников энергии степень несимметрии по стандарту не должна превышать 5%. Определение всех величин, характеризующих трёхфазную цепь, когда действует несимметричная система напряжений, сводится к определению величин от двух симметричных систем, и окончательное решение получается путём наложения результатов, полученных в отдельности для каждой из составляющих симметричных систем. Пусть дана несимме-

тричная система векторов \dot{E}_1, \dot{E}_2 и \dot{E}_3 , сумма которых равна нулю. Величина векторов прямой и обратной последовательности определяется:

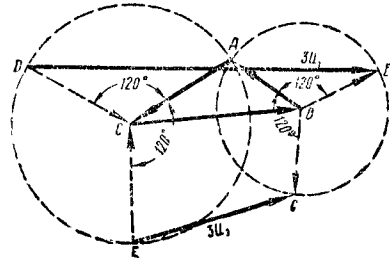
$$3 \dot{E}_{np} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 e^{j120^\circ} + \dot{E}_3 e^{-j120^\circ}; \quad (121)$$

$$3 \dot{E}_{обр} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 e^{-j120^\circ} + \dot{E}_3 e^{j120^\circ}, \quad (122)$$

где \dot{E}_{np} — первый вектор прямой последовательности;

$\dot{E}_{обр}$ — первый вектор обратной последовательности.

Определение векторов прямой и обратной последовательности удобно производить графически (фиг. 19). Для этой цели задан-



Фиг. 19. Нахождение симметричных составляющих прямой и обратной последовательности

ную несимметричную систему векторов строят в виде замкнутого треугольника ABC. Взяв какую-либо сторону этого треугольника за основание, например BC, поворачивают около точек B и C векторы BA и CA на 120° в ту и другую стороны. Тогда вектор ED будет представлять утроенный вектор прямой последовательности, а вектор FG — утроенный вектор обратной последовательности. Угол сдвига между векторами прямой и обратной последовательности определяется углом между векторами ED и FG.

Разложение несимметричной трёхфазной системы на три симметричные. Любая несимметричная трёхфазная система, сумма векторов которой не равна нулю, может быть разложена на три симметричные системы: нулевой, прямой и обратной последовательности. В то время как системы прямой и обратной последовательности каждая в отдельности представляется тремя равными между собой векторами, сдвинутыми на угол 120° , система нулевой последовательности представляет три равных вектора по величине и совпадающих по фазе. Величина вектора нулевой последовательности \dot{E}_0 определяется из условия

$$3 \dot{E}_0 = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_3. \quad (123)$$

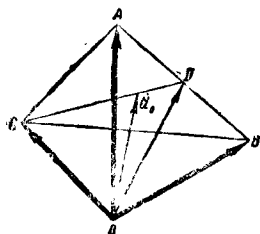
Определение вектора нулевой последовательности проще всего производить графически. Для этого проводят три вектора несимметричной системы, сумма векторов которой не равна нулю, из общей точки O (фиг. 20):

$$\dot{E}_1 = OC; \quad \dot{E}_2 = OA; \quad \dot{E}_3 = OB.$$

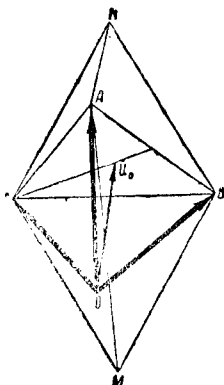
Искомый вектор \dot{E}_0 по величине и фазе равен вектору, соединяющему точку O с

центром тяжести (точкой U_0) треугольника ABC (центр тяжести треугольника ABC отстоит от вершины C на расстоянии $2/3$ длины медианы CD).

Определение векторов прямой и обратной последовательности в этом случае производится следующим графическим построением. Три вектора несимметричной системы, сумма векторов которой не равна нулю, строят из



Фиг. 20. Нахождение вектора нулевой последовательности



Фиг. 21. Нахождение векторов прямой и обратной последовательности

общей точки O (фиг. 21). Соединяя концы двух векторов, например точки C и B , строят на линии CB , как на основании, равнобедренные треугольники CMB и CNB по одну и другую стороны линии CB . Соединив точку M с концом третьего вектора точкой A , получают вектор MA , численно равный утроенному значению вектора прямой последовательности. Соединив точку N с концом третьего вектора точкой A , получают вектор NA , численно равный утроенному значению вектора обратной последовательности. Подобным же образом могут быть получены векторы прямой и обратной последовательности для других фаз, если повторить те же построения, взяв за основание равнобедренного треугольника отрезки AC и BA .

Несинусоидальные переменные токи. Ряд Фурье. В большинстве случаев практики форма кривых периодически изменяющихся э. д. с. и токов в той или иной степени отличается от синусоидальной формы. Причиной этого являются как конструктивные особенности генераторов переменного тока, так и то обстоятельство, что параметры цепи R , L и C лишь в редких случаях остаются неизменными в течение периода.

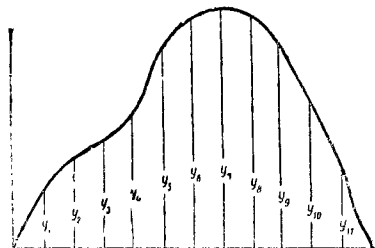
Расчет цепей переменного тока в случае отступления э. д. с. от синусоидальной формы производится на основании теоремы Фурье. Согласно теореме Фурье любая периодическая функция, имеющая на конечном интервале конечное число точек разрыва непрерывности первого рода, может быть представлена в виде бесконечного ряда гармонических функций, период каждой из которых в целое число раз меньше периода данной функции:

$$f(\omega t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + A_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots + A_k \sin(k\omega t + \varphi_k),$$

где A_0 — постоянная составляющая;
 A_1 — амплитуда основной гармоники;
 A_k, A_2, A_3 — амплитуды высших гармоник.

Разложение кривых на высшие гармоники по способу Рунге. В технике сильных токов приходится иметь дело большей частью с такими э. д. с. и токами, которые симметричны относительно оси t . В этом случае в качестве составляющих гармоник входят только нечетные гармоники синуса и косинуса. Разложение таких кривых рассматривается ниже.

Периодическая функция, подлежащая разложению в ряд Фурье, может быть задана в виде графика (осциллограммы). В этих случаях коэффициенты ряда вычисляют приближенным методом. Наиболее простым методом приближенных вычислений является метод Рунге. По этому способу для нахождения первых одиннадцати гармоник половина периода разлагаемой кривой (фиг. 22)



Фиг. 22. Несинусоидальная кривая

делится на двенадцать равных частей. Ординаты, измеренные по масштабу, пишутся в два ряда следующим образом:

| | | | | | |
|-------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| y_1 y_{11} | y_2 y_{10} | y_3 y_9 | y_4 y_8 | y_5 y_7 | y_6 — |
| S_1 d_1 | S_2 d_2 | S_3 d_3 | S_4 d_4 | S_5 d_5 | S_6 d_6 |

Сумма ординат, стоящих друг под другом, будет: $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$.

Разность от вычитания нижних ординат из верхних будет $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$.

Кроме того, вычисляют следующие значения:

$$r_1 = S_1 + S_3 - S_5;$$

$$r_2 = S_2 - S_6;$$

$$e_1 = d_1 - d_3 - d_5.$$

Значения S, d, r_1, r_2, e_1 вставляют в табл. 7. Помножив значения s, d, r_1, r_2, e_1 на синус угла, указанного в той же горизонтальной строчке, определяют суммы $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \Sigma_4$ и т. д. до Σ_{12} , а затем амплитуды отдельных гармоник синусов и косинусов.

Для проверки разложения рекомендуются следующие правила:

$$B_1 + B_3 + B_5 + B_7 + B_9 + B_{11} = 0;$$

$$A_1 - A_3 + A_5 - A_7 + A_9 - A_{11} = y_6$$

Таблица 7

| Амплитуды | | А | | | | | | В | | | | | |
|-------------------|---------------|--|------------|---------------------------------------|------------|---------------------------------------|------------|--|------------|--|---------------|---|---------------|
| Для гармоник | | 1 и 11 | | 3 и 9 | | 5 и 7 | | 1 и 11 | | 3 и 9 | | 5 и 7 | |
| α | $\sin \alpha$ | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 0,259 | S_1 | — | — | — | S_5 | — | — | d_1 | — | — | — | d_5 |
| 30 | 0,5 | — | S_2 | — | — | — | S_3 | d_3 | — | — | — | d_9 | — |
| 45 | 0,707 | S_3 | — | r_1 | — | $-S_5$ | — | — | d_5 | — | e_1 | — | $-d_3$ |
| 60 | 0,866 | — | S_4 | — | — | — | $-S_3$ | d_2 | — | — | — | $-d_2$ | — |
| 75 | 0,966 | S_5 | — | — | r_3 | S_1 | — | — | d_1 | $-d_4$ | — | — | d_5 |
| 90 | 1 | — | S_6 | — | — | — | S_4 | — | — | — | — | — | — |
| Сумма . . | | Σ_1 | Σ_2 | Σ_3 | Σ_4 | Σ_5 | Σ_6 | Σ_7 | Σ_8 | Σ_9 | Σ_{10} | Σ_{11} | Σ_{12} |
| Значение амплитуд | | $A_1 = \frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{6}$ | | $A_3 = \frac{\Sigma_3 + \Sigma_4}{6}$ | | $A_5 = \frac{\Sigma_5 + \Sigma_6}{6}$ | | $B_1 = \frac{\Sigma_7 + \Sigma_8}{6}$ | | $B_3 = \frac{\Sigma_9 + \Sigma_{10}}{6}$ | | $B_5 = \frac{\Sigma_{11} + \Sigma_{12}}{6}$ | |
| | | $A_{11} = \frac{\Sigma_1 - \Sigma_2}{6}$ | | $A_9 = \frac{\Sigma_3 - \Sigma_4}{6}$ | | $A_7 = \frac{\Sigma_5 - \Sigma_6}{6}$ | | $B_{11} = \frac{\Sigma_7 - \Sigma_8}{6}$ | | $B_9 = \frac{\Sigma_9 - \Sigma_{10}}{6}$ | | $B_7 = \frac{\Sigma_{11} - \Sigma_{12}}{6}$ | |

Когда кривая симметрична относительно оси абсцисс и точки перехода через нуль, все разности d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 обращаются в нуль. Поэтому правая часть таблицы Рунге для определения амплитуд косинусоид отсутствует.

Существуют и другие способы разложения, которые подробно рассматриваются в специальных электротехнических справочниках и в курсах электротехники.

Характеристики форм несинусоидальных кривых. При оценке форм несинусоидальных кривых в электротехнике принято пользоваться коэффициентами.

а) Коэффициентом формы, или фактором, называют отношение эффективного значения к среднему значению, взятому за время одного положительного полупериода:

$$K_f = \frac{E}{E_{cp}}; \quad K_f = \frac{I}{I_{cp}}. \quad (124)$$

Для синусоидально изменяющихся величин $K_f = 1,11$.

б) Коэффициентом амплитуды называют отношение максимального значения к эффективному значению:

$$K_a = \frac{E_m}{E}; \quad K_a = \frac{I_m}{I}. \quad (125)$$

Для синусоидально изменяющихся величин $K_a = 1,41$.

в) Коэффициентом искажения называют отношение эффективного значения первой (основной) синусоиды к эффективному значению несинусоидально изменяющейся величины:

$$K_d = \frac{E_1}{E_0}; \quad k_d = \frac{I_1}{I_0}, \quad (126)$$

где E_0 и I_0 — эффективные значения несинусоидальной кривой.

Для синусоидально изменяющихся величин $K_d = 1$.

Форма кривой считается практически синусоидальной, если ни одна из её ординат не отличается от соответствующей ординаты основной гармоники более чем на 5% от амплитуды.

Измерение несинусоидальных токов. Переменный ток несинусоидальной формы измеряется его эффективным значением, равным такому эквивалентному постоянному току, который, проходя по тому же активному сопротивлению, что и переменный, выделяет в единицу времени такое же количество тепла, как и переменный ток.

Действующее значение переменного несинусоидального тока равно

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots + I_k^2}. \quad (127)$$

Аналогично этому выражается и действующее значение э. д. с. и напряжения:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots + E_k^2}. \quad (128)$$

Мощность переменного тока несинусоидальной формы равна сумме мощностей отдельных составляющих гармоник:

$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_3 I_3 \cos \varphi_3 + \dots + U_k I_k \cos \varphi_k. \quad (129)$$

Высшие гармоники в трёхфазных системах. В трёхфазной системе, соединённой в звезду, междуфазовое напряжение не содержит высших гармоник, кратных трём. Поэтому при симметричной трёхфазной системе

$$U_\phi > \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}}.$$

Если трёхфазная система, соединённая в звезду, имеет нейтральный провод, то при равномерной нагрузке всех трёх фаз в случае несинусоидальных токов в нейтральном проводе ток не равен нулю, а равен тройной сумме токов высших гармоник порядка, кратного трём:

$$i_0 = 3 [I_{3m} \sin(3\omega t + \alpha_3) + I_{9m} \sin(9\omega t + \alpha_9) + \dots]. \quad (130)$$

При параллельной работе нескольких генераторов на трёхфазную сеть с нулевым проводом нулевая точка только одного генератора присоединяется к нулевому проводу, так как в противном случае в проводе, соединяющем нулевые точки генераторов, даже при ненагруженной

сети, могут получиться большие токи высших гармоник, кратных трём. В трёхфазных системах, соединённых треугольником, при несинусоидальных э. д. с., наводимых в отдельных фазах, сумма э. д. с., действующих в замкнутом контуре треугольника, не равна нулю, а равна тройной сумме э. д. с. высших гармоник порядка, кратного трём:

$$e_1 + e_2 + e_3 = 3 [E_{3m} \sin(3\omega t + \beta_3) + E_{9m} \sin(9\omega t + \beta_9) + \dots]. \quad (131)$$

Поэтому в трёхфазном генераторе, соединённом в треугольник, даже при разомкнутой внешней цепи, ток в обмотке не равен нулю. При схеме соединения в треугольник в линейных токах отсутствуют гармоники, кратные трём, поэтому при равномерной нагрузке

$$i_d > \frac{I_d}{\sqrt{3}}.$$

Форма кривых тока и напряжения фазовых величин отличается от формы кривых тока и напряжения линейных величин.

Неустановившиеся процессы в электрических цепях. Процесс установления тока. Если параметры, определяющие режим установившегося в цепи тока, изменяются, то переход к новому режиму происходит не мгновенно, а спустя какой-то промежуток времени, так как энергия электрических и магнитных полей должна получить изменение, на что требуется время.

Во время неустановившегося процесса на ток установившегося процесса i_y накладывается так называемый свободный ток i_{cs} . Неустановившиеся процессы в цепях с сосредоточенными постоянными R , L , C для различных цепей подчиняются следующим законам.

Разряд конденсатора с ёмкостью C на активное сопротивление r :

$$U_c = -\frac{1}{C} \int i_{cs} dt = i_{cs} r,$$

$$\text{или} \quad i_{cs} r + \frac{1}{C} \int i_{cs} dt = 0.$$

Из этого уравнения вытекает закон изменения свободного тока и напряжения на обкладках конденсатора:

$$i_{cs} = \frac{U_c}{r} e^{-\frac{t}{rc}}; \quad U_c = U_c e^{-\frac{t}{rc}}, \quad (132)$$

где U_c — напряжение на обкладках конденсатора при $t = 0$.

Ток в цепи R и L при прекращении действия внешней (приложенной) э. д. с. удовлетворяет уравнению:

$$ri_{cs} + L \frac{di_{cs}}{dt} = 0,$$

откуда

$$i_{cs} = I e^{-\frac{r}{L} t}, \quad (133)$$

где I — ток в цепи при $t=0$, т. е. в момент прекращения действия э. д. с.

Разряд конденсатора с ёмкостью C в цепи с r и L удовлетворяет уравнению:

$$ri_{cs} + L \frac{di_{cs}}{dt} + \frac{1}{C} \int i_{cs} dt = 0,$$

$$\text{или} \quad \frac{d^2 i_{cs}}{dt^2} + \frac{r}{L} \frac{di_{cs}}{dt} + \frac{1}{LC} i_{cs} = 0.$$

Решение этого уравнения даёт закон изменения тока в цепи:

$$i_{cs} = A_1 e^{X_1 t} + A_2 e^{X_2 t},$$

где $X_{1,2}$ — корни характеристического уравнения:

$$X_{1,2} = -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{LC}};$$

A_1 и A_2 — постоянные интегрирования. Обозначив U_c — напряжение на обкладках конденсатора при $t = 0$, рассмотрим следующие случаи.

1) $\frac{r^2}{4L^2} > \frac{1}{LC}$; X_1 , X_2 — действительные корни. Закон изменения тока будет

$$i_{cs} = \frac{U_c e^{-\alpha t}}{\sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}} \left(e^{\sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{LC}} t} - e^{-\sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{LC}} t} \right). \quad (134)$$

В этом случае будет разряд, при котором ток возрастает от нуля до максимума и затем убывает, асимптотически приближаясь к нулю.

2) $\frac{r^2}{4L^2} = \frac{1}{LC}$; X_1 , X_2 — равные корни. Закон изменения тока

$$i_{cs} = \frac{U_c}{L} \cdot t e^{-\alpha t}. \quad (135)$$

Это даст аperiodический разряд — ток возрастает от нуля до максимума и затем убывает, асимптотически приближаясь к нулю.

3) $\frac{r^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$; X_1 , X_2 — мнимые корни.

Если обозначить величину $\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2} = \omega^2$ (> 0), то

$$X_{1,2} = -\alpha \pm j\omega.$$

Закон изменения тока и напряжения на обкладках конденсатора будет

$$i_{cs} = \frac{U_c}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t; \quad (136)$$

$$U = \frac{U_c}{\omega \sqrt{LC}} e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \psi), \quad (137)$$

где

$$\psi = \arctg \frac{2\omega L}{r} = \arctg \frac{\omega}{\alpha}.$$

Разряд в этом случае получается затухающий колебательный, характеризуемый следующими величинами.

Коэффициент затухания

$$\alpha = \frac{r}{2L}. \quad (138)$$

Частота колебаний

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}. \quad (139)$$

Период колебания

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}}. \quad (140)$$

Декремент затухания, т. е. отношение двух следующих друг за другом амплитуд одного знака,

$$\Delta = e^{\alpha T}. \quad (141)$$

Логарифмический декремент затухания

$$\delta = \ln \Delta = \alpha T; \quad (142)$$

при $r = 0$ получается колебательный незатухающий разряд, так как энергия при колебании не расходуется.

Включение цепи R и L под постоянное напряжение U :

$$U = ir + L \frac{di}{dt},$$

откуда

$$i = i_y + i_{cs} = \frac{U}{r} \left(1 - e^{-\frac{r}{L} t} \right), \quad (143)$$

т. е. ток возрастает от нуля, асимптотически приближаясь к току установившегося режима, равного $\frac{U}{r}$.

Включение цепи r и C под постоянное напряжение:

$$U = ir + \frac{1}{C} \int idt,$$

откуда

$$i = i_y + i_{cs} = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{rc}}; \quad (144)$$

т. е. ток убывает от начальной величины, равной $\frac{U}{r}$, асимптотически приближаясь к нулю.

Включение цепи r , L и C под постоянное напряжение:

$$ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = U,$$

откуда

$$i = i_y + i_{cs}.$$

Если напряжение на зажимах конденсатора при $t = 0$ будет U'_c , то решение будет аналогично случаю разряда конденсатора на сопротивление и индуктивность (разобранного ранее), только вместо U_c надо подставить значение $U + U'_c$.

Включение цепи r и L под переменное напряжение:

$$ri + L \frac{di}{dt} = U_m \sin(\omega t + \psi),$$

откуда

$$i = i_y + i_{cs} = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{U_m}{Z} \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{r}{L} t}. \quad (145)$$

Ток устанавливается мгновенно, если $\psi - \varphi = 0$ или π , так как при этом ток установившегося режима в момент включения при $t = 0$ равен нулю. Наибольшее значение тока неустановившегося режима будет иметь место при $\psi = 0$ или π . Это значение будет:

$$I_m \left[1 + \sin \varphi e^{-\frac{r}{L\omega} \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right)} \right] < 2 I_m. \quad (146)$$

Включение цепи r и C под переменное напряжение:

$$ri + \frac{1}{C} \int idt = U_m \sin(\omega t + \psi),$$

откуда

$$i = i_y + i_{cs} = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{U_m}{Z} \frac{1}{r\omega C} \cos(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{rc}}. \quad (147)$$

Наибольшее значение тока в момент включения при $t = 0$ будет при $\psi = \frac{\pi}{2}$. Это

значение будет $\frac{I_m}{\cos \varphi}$, т. е. может значительно превзойти I_m . Максимальное напряжение на обкладках конденсатора будет (при малом значении $\frac{1}{rc}$), если $\psi = -\varphi$, но и тогда оно не превысит двойного напряжения при установившемся режиме.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Бабикова М. А. Техника высоких напряжений. Л., Госэнергоиздат, 1947, 312 стр.
2. Китаев Е. В. и Гревцев Н. Ф. Курс общей электротехники. Изд. 2-е М., Оборонгиз, 1942, 594 стр.
3. Круг К. А. Основы электротехники. В двух томах. 6-е изд. М.—Л. Госэнергоиздат, 1946.
4. Миткевич В. Ф. Физические основы электротехники. 3-е изд. Л., Кубуч, 1933, 459 стр.
5. Попов В. С. Электротехнические измерения и приборы. М., Госэнергоиздат, 1947, 363 стр.
6. СЭТ. Справочная книга для электротехников. Под общей редакцией М. А. Шателена, В. Ф. Миткевича и В. А. Толвинского. 6 т. Л., Кубуч, 1928—1935.
7. Энергоснабжение железнодорожных узлов (ИТС). Под редакцией М. А. Петрова, Трансжелдориздат, 1939, 726 стр.

Т Е П Л О Т А



ОБЩИЕ ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ТЕЛ

КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ МАТЕРИИ

Молекулярно-кинетические представления встречаются уже в древности (Демокрит, Левкипп — V в. до нашей эры). В XVII столетии основные представления развиваются П. Гассенди. В XVIII в. Д. Бернулли и М. В. Ломоносов дают уже количественные оценки явлениям. Во многих работах М. В. Ломоносова, и особенно в «Размышлениях о причине теплоты и холода» (1745 — 1746), разрабатываются основные положения зарождающейся кинетической теории материи. В дальнейшем кинетическая теория материи развивается в работах Р. Клаузиуса (1822—1888), Дж. К. Максвелла (1831—1879), Л. Больцмана (1844—1906).

Кинетическая теория материи исходит из представлений о молекулярном строении материи, исследует их с точки зрения законов механики статистики, теории вероятности. Наиболее разработанной является кинетическая теория газов; экспериментальные исследования последних лет позволили изменить размеры атомов, изучить их траектории.

Основные положения кинетической теории газов

По отношению к идеальному газу принимают следующие допущения:

1. Молекулы газа находятся друг от друга на таких расстояниях, что сравнительно с ними можно пренебречь собственным объёмом молекул и считать их точками, обладающими определённой массой (материальные точки).

2. Между молекулами нет сил притяжения и отталкивания, они ведут себя, как абсолютно упругие шары в пустоте.

3. Скорости молекул по абсолютной величине могут быть самыми разнообразными, теоретически от 0 до ∞ ; каждому состоянию газа, отвечающему определённой температуре, соответствует постоянная средняя скорость молекул.

Если скоростью c_1 обладают n_1 молекул, скоростью c_2 — n_2 молекул, . . . скоростью c_k — n_k молекул, причём $n_1 + n_2 + \dots + n_k =$

В главе используются некоторые материалы автора, напечатанные в т. I Энциклопедического справочника «Машиностроение». Машгиз, 1947.

$= N$, то средняя арифметическая скорость молекул

$$\bar{c} = \frac{\sum n_i c_i}{N} = \frac{\int_0^{\infty} c dN}{N},$$

ибо в обычных условиях n_i можно считать бесконечно малым по отношению к N .

Средняя квадратичная скорость Ω находится из выражения (табл. 1)

$$\Omega^2 = \frac{\sum n_i c_i^2}{N} = \frac{\int_0^{\infty} c^2 dN}{N}$$

Таблица 1

Средние квадратичные скорости молекул газов
в м/сек при абсолютных температурах $T_{абс}$

| Газ | 100° | 273,2° | 1273,2° | Газ | 100° | 273,2° | 1273,2° |
|----------------|------|--------|---------|-----------------|------|--------|---------|
| H ₂ | 1112 | 1838 | 3968 | Cl ₂ | 187 | 310 | 669 |
| N ₂ | 298 | 493 | 1064 | CO ₂ | — | 390 | — |
| O ₂ | 279 | 461 | 995 | Hg (пары) | — | 180 | — |

Основное уравнение кинетической теории

Кинетическая теория отождествляет давление (упругость) газа p с действием на единицу площади силы, секундный импульс которой равен сумме импульсов, создаваемых за тот же промежуток времени разрозненными по времени ударами молекул,

$$p = \frac{F}{\sigma};$$

$$F \cdot t = \sum f \tau,$$

где F — сила, действующая на площадь σ ;

$t = 1$;

τ — продолжительность воздействия силы f при ударе молекулы о поверхность.

Основное уравнение кинетической теории

$$pv = \frac{1}{3} N m \Omega^2,$$

где v — объём газа;

m — масса молекулы.

Следствия из основного уравнения кинетической теории

1. На основании предпосылки о постоянстве средней скорости молекул при неизменной температуре из основного уравнения получаем

$$pv = \text{const}$$

— связь между объемом и давлением газа в условиях неизменности температуры.

2. Сопоставление условий $pv = \frac{1}{3} Nm\Omega^2$, $pv = \text{const}$ и уравнения состояния $pv = RT$ (с отнесением этих уравнений к молю) даёт

$$T = \frac{1}{3R} Nm\Omega^2 = \frac{2}{3R} I,$$

где $I = \frac{Nm\Omega^2}{2}$ — внутренняя кинетическая энергия газа, определяющая T .

3. Для идеального газа внутренняя энергия не зависит от объема.

4. При данной температуре для двух газов будем иметь $I_1 = I_2$, откуда

$$\frac{1}{2} N_1 m_1 \Omega_1^2 = \frac{1}{2} N_2 m_2 \Omega_2^2;$$

тепловое и механическое равновесие как следствие отсутствия изменения средних кинетических энергий молекул

$$\left(\frac{1}{2} m_1 \Omega_1^2 = \frac{1}{2} m_2 \Omega_2^2 \right)$$

даёт, что при одинаковых температуре и давлении $N_1 = N_2$ — равенство чисел молекул разных газов в равных объемах при одинаковых p и T .

Число столкновений молекул и средний свободный пробег

Столкновения молекул, при которых они ведут себя, как упругие шары, делают траекторию молекулы ломаной, зигзагообразной линией. Прямолинейные отрезки пути от столкновения до столкновения — свободные пробеги; длина их весьма разнообразна, но средняя величина их для некоторой температуры и давления, определяемая по большому числу молекул, постоянна.

При движении молекул по всем направлениям

$$l = \frac{\omega}{\nu} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{N_1 \pi d^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{m}{\rho \pi d^2},$$

где l — средний свободный пробег;
 ω — средняя скорость молекул;
 ν — число столкновений в единицу времени;
 N_1 — число молекул в единице объема;
 m и d — масса и диаметр молекул;
 $\rho = N_1 \cdot m$ — плотность газа.

Число столкновений в единицу времени одной молекулы

$$\nu = \frac{\omega}{l} = \sqrt{2} \cdot \pi d^2 \omega \cdot N_1.$$

Полное число столкновений всех молекул

$$z = \sqrt{2} \cdot \pi d^2 \omega \cdot N_1^2 \quad (\text{см. табл. 2}).$$

Таблица 2
Молекулярные данные для некоторых газов [40]

| Газ | Диаметр молекулы в см | Скорость в см/сек | Средний свободный пробег | Число столкновений в 1 сек. |
|------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | | | в см | в 1 см ³ |
| при 0° и 1 ат | | | | |
| H ₂ | 2,17·10 ⁻⁸ | 183 800 | 17,8·10 ⁻⁶ | 10 330·10 ⁶ |
| O ₂ | 2,71·10 ⁻⁸ | 46 100 | 10,2·10 ⁻⁶ | 4 520·10 ⁶ |
| N ₂ | 2,95·10 ⁻⁸ | 49 300 | 9,5·10 ⁻⁶ | 5 190·10 ⁶ |
| CO | 2,74·10 ⁻⁸ | 49 300 | 9,5·10 ⁻⁶ | 5 190·10 ⁶ |
| NO | 2,59·10 ⁻⁸ | 47 700 | 9,4·10 ⁻⁶ | 5 070·10 ⁶ |
| CO ₂ | 2,90·10 ⁻⁸ | 39 300 | 6,5·10 ⁻⁶ | 6 050·10 ⁶ |
| N ₂ O | 3,33·10 ⁻⁸ | 39 300 | 6,5·10 ⁻⁶ | 6 050·10 ⁶ |
| SO ₂ | — | 32 600 | 4,7·10 ⁻⁶ | 6 940·10 ⁶ |
| H ₂ O | 2,27·10 ⁻⁸ | 61 500 | 7,2·10 ⁻⁶ | 8 540·10 ⁶ |

Закон распределения скоростей

По Максвеллу, закон распределения скоростей молекул может быть определен из тех же предпосылок, какие применяются в статистике для подсчета ошибки опыта.

По Гауссу, функция вероятности ошибки

$$y = a \cdot e^{-h^2 \cdot x^2};$$

здесь y — число ошибок;

x — величина ошибок;

a и h — постоянные величины.

Число молекул, обладающих скоростями между c и $c + dc$, пропорционально числу молекул N , объему dv и функции вероятности

$$dN = \left[\frac{4\pi}{3} (c + dc)^3 - \frac{4}{3} \pi \cdot c^3 \right] \cdot N a e^{-h^2 c^2};$$

здесь $\frac{4}{3} \pi (c + dc)^3 - \frac{4}{3} \pi \cdot c^3 = 4\pi \cdot c^2 dc = dv$ — объем, равный разности объемов концентрических сфер, описанных радиусами $c + dc$ и c ; dN — число молекул со скоростями в пределах c и $c + dc$, концы векторов которых попадают в указанный объем.

Исследование уравнения даёт, что $a = \frac{h^3}{\pi^2 l^3}$

и $h^2 = \frac{1}{\alpha^2}$, где α — скорость, которой обла-

дает в данных условиях наибольшее число молекул, так называемая наиболее вероятная скорость молекул; откуда

$$dN = \frac{4N \cdot c^2}{\alpha^3 \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{c^2}{\alpha^2}} \cdot dc;$$

если

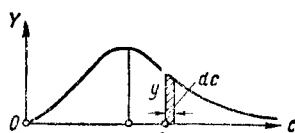
$$y = \frac{dN}{N dc} = \frac{4c^2}{\alpha^3 \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{c^2}{\alpha^2}},$$

то $y \cdot dc = \frac{dN}{N}$ — доля общего числа молекул, приходящаяся на молекулы со скоростями между c и $c + dc$ (см. фиг. 1, кри-

вую распределения скоростей по Максвеллу и табл. 3).

Т а б л и ц а 3
Распределение молекул по скорости [40]
 $\alpha = 1, dc = 1.$

| c | $\frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dc}$ | $\frac{dN}{N} \cdot 100\%$ | Пределы скоростей |
|-----|-----------------------------------|----------------------------|-------------------|
| 0,1 | 0,0223 | 2,2 | 0,1—0,2 |
| 0,2 | 0,0867 | 8,7 | 0,2—0,3 |
| 0,5 | 0,4394 | 43,9 | 0,5—0,6 |
| 0,9 | 0,8132 | 81,3 | 0,9—1,0 |
| 1,0 | 0,8302 | 83,0 | 1,0—1,1 |
| 1,1 | 0,8143 | 81,4 | 1,1—1,2 |
| 1,5 | 0,5859 | 58,6 | 1,5—1,6 |
| 2,0 | 0,1654 | 16,5 | 2,0—2,1 |
| 3,0 | 0,0025 | 0,3 | 3,0—3,1 |



Фиг. 1

Соотношения между скоростями средней арифметической, средней квадратичной и наиболее вероятной

Средняя арифметическая скорость

$$\omega = \frac{\int_0^{\infty} cdN}{N} = \frac{4}{\alpha^3 \sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} c^3 e^{-\frac{c^2}{\alpha^2}} dc = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \alpha = 1,128 \alpha.$$

Средняя квадратичная скорость

$$\Omega^2 = \frac{\int_0^{\infty} c^2 dN}{N} = \frac{4}{\alpha^3 \sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} c^4 e^{-\frac{c^2}{\alpha^2}} dc = \frac{3}{2} \alpha^2;$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \alpha = 1,2247 \alpha.$$

Таким образом, $\alpha < \omega < \Omega$.

Из условия $\Omega^2 = \frac{3}{2} \alpha^2$ найдем $\alpha^2 = \frac{2}{3} \Omega^2$; делая подстановку Ω^2 из уравнения

$$pv = \frac{1}{3} N_1 \cdot m \cdot \Omega^2,$$

отнесённого к молю, получаем

$$\alpha^2 = \frac{2pv^3}{N_1 m} = 2 \left(\frac{R}{N_1} \right) \cdot \frac{T}{m} = \frac{2kT}{m},$$

где $k = \frac{R}{N_1}$ — константа Больцмана.

Выражение для числа молекул, обладающих скоростями между c и $c + dc$ (закон распределения), имеет вид:

$$dN = \frac{4Nc^2}{\left(\frac{2kT}{m}\right)^{3/2} \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{mc^2}{2kT}} dc.$$

Число молекул N_{c_0} , скорости которых превышают значение c_0 , будет

$$N_{c_0} = \frac{4N}{\left(\frac{2kT}{m}\right)^{3/2} \sqrt{\pi}} \int_{c_0}^{\infty} c^2 \cdot e^{-\frac{mc^2}{2kT}} dc = \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \int_{x_0}^{\infty} x^2 \cdot e^{-x^2} dx,$$

$$\text{где } x^2 = \frac{1}{2} \frac{mc^2}{kT}$$

и

$$x_0^2 = \frac{1}{2} \frac{mc_0^2}{kT} = \frac{1}{2} \frac{m \cdot N_1 c_0^2}{k \cdot N_1 \cdot T} = \frac{E}{RT},$$

причём E — кинетическая энергия моля, отвечающая скорости молекул c_0 .

Интегрирование по частям даёт

$$N_{c_0} = \frac{2N}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} - \int_0^{x_0} e^{-x^2} dx + x_0 \cdot e^{-x_0^2} \right);$$

для решения необходимы табличные значения интеграла $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x_0} e^{-x^2} dx$ для различных x_0 .

В физической химии при $x_0^2 = \frac{E}{RT}$, превышающем 30, с достаточной степенью приближения принимаю

$$N_{c_0} = \frac{2N}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-x_0^2} \left(x_0 + \frac{1}{2x_0} - \frac{1}{4x_0^3} + \frac{3}{8x_0^5} \dots \right).$$

Если рассматривать распределение скоростей в двух измерениях вместо трёх, получается простое выражение. Закон распределения, получаемый так, даёт численные результаты, не сильно отличные от результатов трёхмерного распределения, и его иногда используют для расчётных целей.

Если молекулы имеют компоненты скорости между u и $u+du$ и v и $v+dv$, $u^2+v^2=c^2$, то общее число молекул со скоростями между c и $c+dc$ будет

$$dN = \frac{2N}{\alpha^2} \cdot e^{-\frac{c^2}{\alpha^2}} \cdot c \cdot dc = \frac{N}{RT} \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot dE,$$

где $\alpha^2 = \frac{2kT}{m}$, $\frac{1}{2} mc^2 = \frac{E}{N_1}$, $R = kN_1$, причём

E — кинетическая энергия моля.

Число молекул, энергия моля которых превышает заданную величину E ,

$$N_E = N \cdot e^{-\frac{E}{RT}}.$$

ЕДИНИЦЫ ТЕПЛОТЫ И ТЕМПЕРАТУРА

Однозначная функция состояния тела — температура, — широко используется как параметр этого состояния.

Элементарное представление о температуре базируется на повседневном опыте и ощущениях различной нагретости тел; под температурой понимают степень нагретости тела; точное представление даётся термодинамической шкалой.

По кинетической теории газов температура определяется внутренней кинетической энергией (J) газа $T = \frac{2}{3R} J$ (см. кинетическую теорию материи).

Для определения температуры используются приборы, шкалы которых наводятся, исходя из изменения под влиянием температуры некоторых физических величин и свойств тел.

Подробнее смотри: ТСЖ, т. I, «Единицы теплоты», стр. 610 и т. II, «Измерения температуры».

ТЕПЛОЁМКОСТЬ

Под теплоёмкостью понимают отношение количества теплоты, поглощённого системой в каком-либо процессе, к соответствующему повышению температуры.

Истинная теплоёмкость — теплоёмкость системы, определяемая при условии, что изменение температуры исчезающе мало

$$C = \frac{dQ}{dt},$$

где dQ — сообщённая теплота;

dt — исчезающе малое повышение температуры (для установления требуется указание характера процесса, температуры, давления, при которых определяется истинная теплоёмкость).

Средняя теплоёмкость — теплоёмкость системы, определяемая при условии повышения температуры на конечную величину

$$C_m = \frac{Q}{t_2 - t_1} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c dt,$$

где Q — сообщённая теплота;

t_1 и t_2 — начальная и конечная температуры.

Для установления средней теплоёмкости необходимо указание характера процесса, начальной и конечной температур, давления.

Удельная теплоёмкость (истинная c $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ или средняя c_m $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$) — теплоёмкость единицы массы вещества.

Атомная теплоёмкость — теплоёмкость граммола химического элемента, равная удельной теплоёмкости, умноженной на атомный вес.

Молярная теплоёмкость — теплоёмкость моля вещества, равная удельной тепло-

ёмкости, умноженной на молекулярный вес, — истинная μc , средняя μc_m $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{моль} \cdot \text{град}}$.

Объёмная теплоёмкость — теплоёмкость единицы объёма газа \bar{c} , равная $\bar{c} = c \gamma$, где γ — удельный вес газа при тех условиях, для которых известно значение c и вычисляется \bar{c} .

Чаще в теплотехнических расчётах находят \bar{c} по выражению

$$\bar{c} = c \cdot \gamma_{0^\circ \text{C}, 760} = c \cdot \gamma_n = \frac{\mu c}{22,4},$$

где c или μc берётся при тех условиях, для которых находится \bar{c} ;

$\gamma_{0^\circ \text{C}, 760} = \gamma_n = \frac{\mu}{22,4}$ — удельный вес при нормальных (0°C , 760 мм рт. ст.) условиях.

Разница представлений в следующем: в первом случае объёмная теплоёмкость определяется по отношению к массе газа, заключающейся в единице объёма при тех условиях, для которых нужно найти \bar{c} (масса переменна, зависит от p и t); во втором — объёмную теплоёмкость условно относят к постоянной массе газа, заключающейся в единице объёма при 0°C и 760 мм рт. ст.

В первом случае размерность $\bar{c} = \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}}$, во втором — $\frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3 \cdot \text{град}}$.

Изохорная теплоёмкость — теплоёмкость системы, определённая при условии неизменности объёма, может быть истинной или средней, притом удельной, молярной, объёмной; обозначения: c_v , μc_v ,

$$\bar{c}_v, \quad c_{v, m}, \quad \mu c_{v, m}, \quad \bar{c}_{v, m}.$$

Изобарная теплоёмкость системы, определённая при постоянном давлении, может быть истинной или средней, притом удельной, молярной, объёмной; обозначения:

$$c_p, \quad \mu c_p, \quad \bar{c}_p, \quad c_{p, m}, \quad \mu c_{p, m}, \quad \bar{c}_{p, m}.$$

Для идеального газа теплоёмкости зависят только от температуры, реальные газы обнаруживают зависимость от давления или объёма.

При атмосферном давлении в пределах от 0 до 100°C расхождения экспериментальных данных дают: воздух — 1%, H_2 и N_2 — 1,5%, O_2 — 1,75%, NH_3 — 2,5%, CO_2 — 4,1%, H_2O — 8,0%, для более высоких температур расхождения выше.

Теплоёмкости газов для состояний, находящихся вблизи от условий конденсации, растут с повышением температуры, влияние давления при более высоких температурах должно быть меньше; изобарные теплоёмкости даются функциями t и p , изохорные — функциями t и v (см. табл. 4).

В технических расчётах часто исходят из предположения, что молярные теплоёмкости двухатомных газов одинаковы при равных температурах и давлениях; уже трёхатомные газы не подчиняются этому правилу.

Т а б л и ц а 4

| $c_p \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ для воздуха | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| При $p=1$ ат и различных температурах $t^\circ\text{C}$ | | | | | | | | | | | | |
| t | -100 | -75 | -50 | -25 | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | 250 |
| c_p | 0,2285 | 0,2290 | 0,2304 | 0,2339 | 0,2405 | 0,2410 | 0,2415 | 0,2419 | 0,2424 | 0,2434 | 0,2443 | 0,2453 |
| При $t=0^\circ\text{C}$ и различных давлениях | | | | | | | | | | | | |
| p | 1 | 20 | 60 | 100 | 140 | 180 | 220 | | | | | |
| c_p | 0,2405 | 0,2492 | 0,2655 | 0,2833 | 0,2985 | 0,3093 | 0,3187 | | | | | |
| При $t=250^\circ\text{C}$ и различных давлениях | | | | | | | | | | | | |
| p | 1 | 20 | 60 | 100 | 140 | 180 | 220 | | | | | |
| c_p | 0,2453 | 0,2463 | 0,2500 | 0,2536 | 0,2566 | 0,2596 | 0,2622 | | | | | |

По Лангену и Шреберу, истинные молярные теплоёмкости двухатомных газов

$$\mu c_v = 4,914 + 0,00106 t = 4,625 + 0,00106 T \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}};$$

$$\mu c_p = 6,904 + 0,00106 t = 6,615 + 0,00106 T \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}};$$

для CO_2

$$\mu c_v = 7,805 + 0,00378 t = 6,774 + 0,00378 T \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}};$$

$$\mu c_p = 9,795 + 0,00378 t = 8,764 + 0,00378 T \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}};$$

для H_2O — при тех состояниях, в которых он находится в дымовых газах и воздухе (сильно перегрет, давления меньше атмосферного)

$$\mu c_v = 7,488 + 0,00232 t = 6,855 + 0,00232 T \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}};$$

$$\mu c_p = 9,478 + 0,00232 t = 8,845 + 0,00232 T \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}}.$$

При линейных зависимостях истинных теплоёмкостей от $t^\circ\text{C}$ пересчёт этих зависимостей в функции $T_{\text{абс}}^\circ$ даёт

$$\mu c = \mu a + \mu b t = \mu a' + \mu b T \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}};$$

$$c = a + b t = a' + b T \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}},$$

где $a' = a - 273 b$;

$$\bar{c} = \bar{a} + \bar{b} t = \bar{a}' + \bar{b} T \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}},$$

$$\text{где } \bar{a} = \frac{\mu a}{22,4}, \bar{b} = \frac{\mu b}{22,4}; \bar{a}' = \bar{a} - 273 \bar{b}.$$

При линейных зависимостях

$$\mu c = \mu a + \mu b t, c = a + b t, \bar{c} = \bar{a} + \bar{b} t$$

— выражения средних теплоёмкостей в интервале от $t_1^\circ\text{C}$ до $t_2^\circ\text{C}$ ($T_{\text{абс}1}^\circ$ до $T_{\text{абс}2}^\circ$) будут:

$$\mu c_m = \mu a + \frac{\mu b}{2} (t_2 + t_1) = \frac{T_2}{T_1} \mu c_m =$$

$$= \mu a' + \frac{\mu b}{2} (T_2 + T_1),$$

$$\frac{t_2}{t_1} c_m = a + \frac{b}{2} (t_2 + t_1) = \frac{T_2}{T_1} c_m =$$

$$= a' + \frac{b}{2} (T_2 + T_1);$$

$$\frac{t_2}{t_1} \bar{c}_m = \bar{a} + \frac{\bar{b}}{2} (t_2 + t_1) = \frac{T_2}{T_1} \bar{c}_m =$$

$$= \bar{a}' + \frac{\bar{b}}{2} (T_2 + T_1),$$

где $\mu a, a, \bar{a}, \mu b, b, \bar{b}$ — коэффициенты из выражений истинных теплоёмкостей.

Теоретические расчёты, основанные на данных спектроскопического исследования, относящиеся к 1933—1936 гг., дали новые значения теплоёмкостей. Для H_2O при температурах, больших 1900°C , новые значения оказываются меньшими, чем по данным более раннего периода; при более низких температурах, наоборот, новые значения

больше старых. Для CO_2 новые значения превышают старые значения. Для двухатомных газов исследования показали, что обычное допущение о равенстве молярных теплоемкостей их не оправдывается; при достаточно высоких температурах (2000—2500°C) молярные теплоемкости для различных двухатомных газов отличаются друг от друга (\sim на 6%). В работе М. А. Хайлова см. обзор и анализ данных о теплоемкостях; теплоемкости, опубликованные в работах Юсти и Шмидта, признаются более точными по сравнению с теплоемкостями, полученными ранее калориметрическими методами.

Табл. 5 и 6 дают истинные и средние теплоемкости при постоянном давлении по Юсти. Табл. 7 даёт средние теплоемкости при постоянном объёме по Шмидту. Табл. 8 и 9 дают уравнения для теплоемкостей по Юсти и Шмидту. М. А. Хайлов для облегчения технических расчетов предлагает упрощённые уравнения, выражающие теплоемкости линейными функциями температуры; эти уравнения дают теплоемкость с точностью до 1% по отношению к табличным данным (см. табл. 10 и 11).

В табл. 11¹ даются для CO_2 , N_2 , O_2 , H_2O , воздуха сухого, воздуха влажного ($d = 10 \text{ г/кг}$) средние объёмные теплоемкости при постоянном давлении от 0°C до $t^\circ\text{C}$, разработанные ВТИ [35], как нормы для теплового расчёта котельных агрегатов.

Данные о теплоемкостях газов при высоких давлениях приведены в работе И. Годнева и А. Свердлина [12].

Таблица 6

Средние молярные теплоемкости от 0°C до $t^\circ\text{C}$

при постоянном давлении $\mu_{p,m} \left| \frac{t}{0} \right| \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$

(по данным Юсти)

| Газы $t^\circ\text{C}$ | H_2 | N_2 | O_2 | CO | H_2O | CO_2 | Воздух |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|----------------------|---------------|--------|
| 100 | 6,92 | 6,97 | 7,05 | 6,97 | 8,03 | 9,17 | 6,96 |
| 200 | 6,95 | 7,00 | 7,15 | 7,00 | 8,12 | 9,65 | 7,01 |
| 300 | 6,97 | 7,04 | 7,26 | 7,06 | 8,22 | 10,06 | 7,06 |
| 400 | 6,98 | 7,09 | 7,38 | 7,12 | 8,34 | 10,40 | 7,13 |
| 500 | 6,99 | 7,15 | 7,49 | 7,19 | 8,47 | 10,75 | 7,20 |
| 600 | 7,01 | 7,21 | 7,59 | 7,27 | 8,60 | 11,03 | 7,27 |
| 700 | 7,03 | 7,27 | 7,68 | 7,34 | 8,74 | 11,28 | 7,34 |
| 800 | 7,06 | 7,35 | 7,77 | 7,43 | 8,89 | 11,50 | 7,42 |
| 900 | 7,09 | 7,42 | 7,85 | 7,50 | 9,04 | 11,70 | 7,49 |
| 1000 | 7,12 | 7,49 | 7,92 | 7,57 | 9,18 | 11,88 | 7,56 |
| 1100 | 7,15 | 7,56 | 7,98 | 7,64 | 9,32 | 12,05 | 7,62 |
| 1200 | 7,20 | 7,62 | 8,04 | 7,70 | 9,45 | 12,19 | 7,68 |
| 1300 | 7,24 | 7,67 | 8,11 | 7,76 | 9,58 | 12,32 | 7,73 |
| 1400 | 7,28 | 7,73 | 8,16 | 7,81 | 9,72 | 12,45 | 7,78 |
| 1500 | 7,32 | 7,78 | 8,20 | 7,85 | 9,84 | 12,56 | 7,84 |
| 1600 | 7,36 | 7,82 | 8,24 | 7,90 | 9,96 | 12,66 | 7,88 |
| 1700 | 7,40 | 7,86 | 8,28 | 7,94 | 10,09 | 12,75 | 7,92 |
| 1800 | 7,45 | 7,91 | 8,33 | 7,98 | 10,20 | 12,84 | 7,96 |
| 1900 | 7,49 | 7,94 | 8,38 | 8,02 | 10,30 | 12,92 | 7,99 |
| 2000 | 7,53 | 7,98 | 8,42 | 8,05 | 10,41 | 12,99 | 8,03 |
| 2100 | 7,57 | 8,01 | 8,45 | 8,09 | 10,52 | 13,06 | 8,06 |
| 2200 | 7,62 | 8,05 | 8,48 | 8,12 | 10,61 | 13,13 | 8,08 |
| 2300 | 7,66 | 8,08 | 8,52 | 8,15 | 10,71 | 13,19 | 8,12 |
| 2400 | 7,70 | 8,10 | 8,56 | 8,18 | 10,79 | 13,24 | 8,14 |
| 2500 | 7,74 | 8,14 | 8,59 | 8,21 | 10,87 | 13,30 | 8,18 |
| 2600 | 7,78 | 8,17 | 8,63 | 8,24 | 10,96 | 13,34 | 8,20 |
| 2700 | 7,81 | 8,19 | 8,65 | 8,26 | 11,03 | 13,39 | 8,23 |
| 2800 | 7,85 | 8,22 | 8,68 | 8,28 | 11,11 | 13,43 | 8,25 |
| 2900 | 7,89 | 8,24 | 8,72 | 8,30 | 11,18 | 13,48 | 8,27 |
| 3000 | 7,92 | 8,26 | 8,76 | 8,32 | 11,23 | 13,52 | 8,29 |

Таблица 5

Истинные молярные теплоемкости при постоянном

давлении $\mu_{p,m} \left| \frac{t}{0} \right| \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$ (по данным Юсти)

| Газы $t^\circ\text{C}$ | H_2 | N_2 | O_2 | CO | H_2O | CO_2 | Воздух |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|----------------------|---------------|--------|
| 0 | 6,86 | 6,96 | 6,99 | 6,96 | 7,98 | 8,61 | 6,94 |
| 100 | 6,96 | 6,98 | 7,13 | 7,00 | 8,10 | 9,69 | 6,99 |
| 200 | 6,99 | 7,05 | 7,37 | 7,09 | 8,32 | 10,47 | 7,10 |
| 300 | 7,01 | 7,16 | 7,61 | 7,23 | 8,56 | 11,23 | 7,24 |
| 400 | 7,03 | 7,31 | 7,84 | 7,40 | 8,84 | 11,79 | 7,40 |
| 500 | 7,06 | 7,47 | 8,02 | 7,57 | 9,12 | 12,25 | 7,57 |
| 600 | 7,12 | 7,63 | 8,18 | 7,75 | 9,41 | 12,63 | 7,72 |
| 700 | 7,20 | 7,78 | 8,31 | 7,90 | 9,72 | 12,94 | 7,87 |
| 800 | 7,28 | 7,91 | 8,41 | 8,03 | 10,02 | 13,20 | 7,99 |
| 900 | 7,38 | 8,03 | 8,50 | 8,15 | 10,30 | 13,41 | 8,10 |
| 1000 | 7,49 | 8,14 | 8,60 | 8,24 | 10,58 | 13,60 | 8,21 |
| 1100 | 7,59 | 8,24 | 8,66 | 8,33 | 10,84 | 13,74 | 8,29 |
| 1200 | 7,69 | 8,32 | 8,73 | 8,41 | 11,08 | 13,87 | 8,37 |
| 1300 | 7,80 | 8,38 | 8,79 | 8,47 | 11,31 | 13,98 | 8,43 |
| 1400 | 7,89 | 8,44 | 8,85 | 8,53 | 11,52 | 14,07 | 8,49 |
| 1500 | 7,98 | 8,49 | 8,90 | 8,57 | 11,71 | 14,15 | 8,54 |
| 1600 | 8,08 | 8,54 | 8,96 | 8,62 | 11,88 | 14,22 | 8,59 |
| 1700 | 8,16 | 8,59 | 9,01 | 8,66 | 12,04 | 14,28 | 8,64 |
| 1800 | 8,24 | 8,63 | 9,08 | 8,69 | 12,19 | 14,33 | 8,68 |
| 1900 | 8,32 | 8,66 | 9,14 | 8,72 | 12,33 | 14,38 | 8,72 |
| 2000 | 8,38 | 8,70 | 9,19 | 8,75 | 12,45 | 14,42 | 8,77 |
| 2100 | 8,45 | 8,73 | 9,24 | 8,78 | 12,57 | 14,46 | 8,80 |
| 2200 | 8,51 | 8,76 | 9,29 | 8,81 | 12,68 | 14,49 | 8,83 |
| 2300 | 8,57 | 8,78 | 9,34 | 8,83 | 12,78 | 14,52 | 8,86 |
| 2400 | 8,62 | 8,80 | 9,39 | 8,85 | 12,87 | 14,54 | 8,89 |
| 2500 | 8,68 | 8,83 | 9,43 | 8,87 | 12,95 | 14,57 | 8,92 |
| 2600 | 8,73 | 8,84 | 9,47 | 8,89 | 13,02 | 14,59 | 8,94 |
| 2700 | 8,78 | 8,86 | 9,51 | 8,90 | 13,08 | 14,61 | 8,96 |
| 2800 | 8,83 | 8,88 | 9,55 | 8,91 | 13,14 | 14,63 | 8,98 |
| 2900 | 8,88 | 8,89 | 9,59 | 8,92 | 13,18 | 14,64 | 9,00 |
| 3000 | 8,93 | 8,90 | 9,62 | 8,93 | 13,23 | 14,66 | 9,02 |

Таблица 7

Средние молярные теплоемкости от 0°C до $t^\circ\text{C}$

при постоянном объёме $\mu_{v,m} \left| \frac{T}{0} \right| \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$

(по данным Шмидта)

| Газы $T^\circ\text{abs}$ | H_2 | N_2 | O_2 | CO | H_2O | CO_2 | CH_4 | Воздух |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|----------------------|---------------|---------------|--------|
| 273 | 4,792 | 4,959 | 4,91 | 4,960 | 5,926 | 5,400 | 6,012 | 4,930 |
| 300 | 4,798 | 4,960 | 4,93 | 4,961 | 5,935 | 5,530 | 6,051 | 4,935 |
| 350 | 4,818 | 4,963 | 4,97 | 4,965 | 5,951 | 5,770 | 6,160 | — |
| 400 | 4,838 | 4,966 | 5,008 | 4,969 | 5,973 | 6,010 | 6,314 | 4,957 |
| 500 | 4,869 | 4,980 | 5,063 | 4,990 | 6,033 | 6,480 | 6,734 | 4,979 |
| 600 | 4,891 | 5,007 | 5,147 | 5,027 | 6,113 | 6,910 | 7,236 | 5,018 |
| 700 | 4,913 | 5,047 | 5,239 | 5,077 | 6,210 | 7,290 | 7,797 | 5,068 |
| 800 | 4,932 | 5,097 | 5,333 | 5,137 | 6,318 | 7,670 | 8,356 | 5,101 |
| 900 | 4,953 | 5,154 | 5,427 | 5,202 | 6,433 | 7,990 | 8,929 | 5,191 |
| 1000 | 4,977 | 5,215 | 5,513 | 5,269 | 6,551 | 8,270 | 9,467 | 5,257 |
| 1100 | 5,006 | 5,272 | 5,592 | 5,338 | 6,681 | 8,500 | 9,980 | 5,318 |
| 1200 | 5,034 | 5,331 | 5,667 | 5,403 | 6,815 | 8,770 | 10,50 | 5,382 |
| 1300 | 5,068 | 5,392 | 5,736 | 5,467 | 6,949 | 9,000 | 10,99 | 5,442 |
| 1400 | 5,102 | 5,452 | 5,801 | 5,526 | 7,081 | 9,180 | 11,50 | 5,502 |
| 1500 | 5,144 | 5,512 | 5,863 | 5,586 | 7,210 | 9,360 | — | 5,562 |
| 1600 | 5,182 | 5,568 | 5,917 | 5,639 | 7,338 | 9,510 | — | 5,618 |
| 1700 | 5,224 | 5,621 | 5,966 | 5,690 | 7,464 | 9,660 | — | 5,669 |
| 1800 | 5,266 | 5,671 | 6,010 | 5,740 | 7,585 | 9,800 | — | 5,717 |
| 1900 | 5,308 | 5,717 | 6,059 | 5,786 | 7,704 | 9,940 | — | 5,764 |
| 2000 | 5,350 | 5,763 | 6,090 | 5,831 | 7,820 | 10,05 | — | 5,806 |
| 2100 | 5,392 | 5,804 | 6,140 | 5,872 | 7,930 | 10,16 | — | 5,848 |
| 2200 | 5,434 | 5,840 | 6,176 | 5,911 | 8,030 | 10,26 | — | 5,884 |
| 2300 | 5,474 | 5,880 | 6,210 | 5,947 | 8,140 | 10,36 | — | 5,922 |
| 2400 | 5,513 | 5,912 | 6,241 | 5,982 | 8,240 | 10,45 | — | 5,954 |
| 2500 | 5,554 | 5,944 | 6,274 | 6,014 | 8,340 | 10,53 | — | 5,986 |
| 2600 | 5,591 | 5,977 | 6,305 | 6,047 | 8,430 | 10,61 | — | 6,017 |
| 2700 | 5,629 | 6,008 | 6,324 | 6,078 | 8,520 | 10,68 | — | 6,047 |
| 2800 | 5,673 | 6,040 | 6,353 | 6,107 | 8,610 | 10,75 | — | 6,074 |
| 2900 | 5,705 | 6,067 | 6,379 | 6,134 | 8,690 | 10,81 | — | 6,104 |
| 3000 | 5,743 | 6,095 | 6,404 | 6,158 | 8,770 | 10,86 | — | 6,131 |

Таблица 8
Средние молярные теплоёмкости от 0°С
до t°С при p=const
(по данным Юсти)

| Газы | Эмпирические уравнения $\left(\mu_{p,m} \int_0^t \text{в } \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}} \right)$ |
|----------------|---|
| Воздух | Для температур от t=100° до t=900°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 6,919 + 0,374 \cdot 10^{-3} \cdot t +$ $+ 0,3150 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |
| | Для температур от t=900° до t=3000°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 6,848 + 0,815 \cdot 10^{-3} \cdot t -$ $- 0,1120 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |
| O ₂ | Для температур от t=100° до t=1000°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 6,931 + 1,211 \cdot 10^{-3} \cdot t -$ $- 0,222 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |
| | Для температур от t=1000° до t=3000°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 7,242 + 0,768 \cdot 10^{-3} \cdot t -$ $- 0,09 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |
| N ₂ | Для температур от t=100° до t=1000°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 6,939 + 0,279 \cdot 10^{-3} \cdot t +$ $+ 0,287 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |
| | Для температур от t=1000° до t=3000°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 6,773 + 0,828 \cdot 10^{-3} \cdot t -$ $- 0,1137 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |
| H ₂ | Для температур от t=100° до t=500°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 6,881 + 0,425 \cdot 10^{-3} \cdot t -$ $- 0,415 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |
| | Для температур от t=500° до t=1500°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 6,925 + 0,963 \cdot 10^{-3} \cdot t +$ $+ 0,133 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |
| | Для температур от t=1500° до t=3000°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 6,561 + 0,559 \cdot 10^{-3} \cdot t -$ $- 0,035 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |
| CO | Для температур от t=100° до t=1000°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 6,894 + 0,49 \cdot 10^{-3} \cdot t +$ $+ 0,205 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |
| | Для температур от t=1000° до t=3000°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 6,852 + 0,833 \cdot 10^{-3} \cdot t -$ $- 0,115 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |

Продолжение табл. 8

| | |
|------------------|--|
| CO ₂ | Для температур от t=100° до t=1000°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 8,703 + 4,86 \cdot 10^{-3} \cdot t -$ $- 1,683 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |
| | Для температур от t=1000° до t=3000°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 10,3 + 1,89 \cdot 10^{-3} \cdot t -$ $- 0,275 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |
| H ₂ O | Для температур от t=100° до t=1300°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 7,897 + 1,03 \cdot 10^{-3} \cdot t +$ $+ 0,178 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |
| | Для температур от t=1300° до t=3000°С $\mu_{p,m} \int_0^t = 7,513 + 1,863 \cdot 10^{-3} \cdot t -$ $- 0,208 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ |

Таблица 9
Средние молярные теплоёмкости газов от 0° абс.
до T° абс. при p=const
(по данным Шмидта)

| Газы | Эмпирические уравнения $\left(\mu_{p,m} \int_0^T \text{в } \frac{\text{к кал}}{\text{моль} \cdot \text{град}} \right)$ |
|----------------|---|
| Воздух | Для температур от T=300° до T=900° абс. $\mu_{p,m} \int_0^T = 6,927 - 0,1730 \cdot 10^{-3} \cdot T +$ $+ 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ |
| | Для температур от T=700° до T=3000° абс. $\mu_{p,m} \int_0^T = 6,52 + 0,831 \cdot 10^{-3} \cdot T -$ $- 0,1006 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ |
| O ₂ | Для температур от T=300° до T=900° абс. $\mu_{p,m} \int_0^T = 6,761 + 0,4090 \cdot 10^{-3} \cdot T +$ $+ 0,35 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ |
| | Для температур от T=900° до T=3000° абс. $\mu_{p,m} \int_0^T = 6,658 + 0,9720 \cdot 10^{-3} \cdot T -$ $- 0,1329 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ |
| N ₂ | Для температур от T=300° до T=900° абс. $\mu_{p,m} \int_0^T = 6,998 - 0,344 \cdot 10^{-3} \cdot T +$ $+ 0,556 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ |
| | Для температур от T=900° до T=3000° абс. $\mu_{p,m} \int_0^T = 6,427 + 0,874 \cdot 10^{-3} \cdot T -$ $- 0,111 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ |

Продолжение табл. 9

| | |
|--------|--|
| H_2 | <p>Для температур от $T=300^\circ$ до $T=1600^\circ$ абс.</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^T = 6,774 + 0,124 \cdot 10^{-3} \cdot T +$ $+ 0,071 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ <p>Для температур от $T=1600^\circ$ до $T=3000^\circ$ абс.</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^T = 6,424 + 0,496 \cdot 10^{-3} \cdot T -$ $- 0,021 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ |
| CO | <p>Для температур от $T=300^\circ$ до $T=1000^\circ$ абс.</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^T = 6,989 - 0,325 \cdot 10^{-3} \cdot T +$ $+ 0,606 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ <p>Для температур от $T=1000^\circ$ до $T=3000^\circ$ абс.</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^T = 6,455 + 0,916 \cdot 10^{-3} \cdot T -$ $- 0,118 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ |
| CO_2 | <p>Для температур от $T=300^\circ$ до $T=1300^\circ$ абс.</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^T = 5,835 + 6,1 \cdot 10^{-3} \cdot T -$ $- 1,67 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ <p>Для температур от $T=1300^\circ$ до $T=3000^\circ$ абс.</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^T = 8,018 + 2,795 \cdot 10^{-3} \cdot T -$ $- 0,395 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ |
| H_2O | <p>Для температур от $T=300^\circ$ до $T=1200^\circ$ абс.</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^T = 7,857 + 0,017 \cdot 10^{-3} \cdot T +$ $+ 0,642 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ <p>Для температур от $T=1200^\circ$ до $T=3000^\circ$ абс.</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^T = 6,948 + 1,748 \cdot 10^{-3} \cdot T -$ $- 0,16 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ |

Таблица 10
Средние молярные теплоемкости газов от 0° абс до T° абс при $p = \text{const.}$
(по данным Юсти с точностью до 1%)

| Газы | Эмпирические уравнения |
|--------|---|
| | $\left(\mu c_{p,m} \Big _0^t \right) = \frac{\kappa \text{ кал}}{\text{моль} \cdot ^\circ \text{град}}$ |
| Воздух | <p>Для температур от $t=100^\circ$ до $t=1600^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 6,92 + 0,61 \cdot 10^{-3} \cdot t$ <p>Для температур от $t=1600^\circ$ до $t=3000^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 7,41 + 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |

| | |
|--------|--|
| O_2 | <p>Для температур от $t=100^\circ$ до $t=1300^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 7,02 + 0,86 \cdot 10^{-3} \cdot t$ <p>Для температур от $t=1300^\circ$ до $t=3000^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 7,64 + 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| N_2 | <p>Для температур от $t=100^\circ$ до $t=1600^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 6,89 + 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot t$ <p>Для температур от $t=1600^\circ$ до $t=3000^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 7,33 + 0,32 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| H_2 | <p>Для температур от $t=100^\circ$ до $t=1100^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 6,9 + 0,21 \cdot 10^{-3} \cdot t$ <p>Для температур от $t=700^\circ$ до $t=3000^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 6,75 + 0,39 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| CO | <p>Для температур от $t=100^\circ$ до $t=1600^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 6,91 + 0,63 \cdot 10^{-3} \cdot t$ <p>Для температур от $t=1600^\circ$ до $t=3000^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 7,42 + 0,31 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| CO_2 | <p>Для температур от $t=100^\circ$ до $t=800^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 8,95 + 3,32 \cdot 10^{-3} \cdot t$ <p>Для температур от $t=800^\circ$ до $t=1700^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 10,51 + 1,33 \cdot 10^{-3} \cdot t$ <p>Для температур от $t=1700^\circ$ до $t=3000^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 11,79 + 0,59 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| H_2O | <p>Для температур от $t=100^\circ$ до $t=2000^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 7,85 + 1,31 \cdot 10^{-3} \cdot t$ <p>Для температур от $t=1900^\circ$ до $t=3000^\circ$ C</p> $\mu c_{p,m} \Big _0^t = 8,70 + 0,86 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |

Таблица 11
Средние молярные теплоёмкости газов от 0° абс. до T° абс. при p=const
(По данным Шмидта с точностью до 1%)

| Газы | Эмпирические уравнения $\left(\mu_{c_{p,m}} \int_0^T \frac{T}{\text{моль} \cdot \text{град}} \right)$ |
|-----------------|---|
| Воздух | <p>Для температур от T=300° до T=2000° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 6,708 + 0,543 \cdot 10^{-3} \cdot T$ <p>Для температур от T=2000° до T=3000° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 7,08 + 0,35 \cdot 10^{-3} \cdot T$ |
| O ₂ | <p>Для температур от T=300° до T=1700° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 6,728 + 0,736 \cdot 10^{-3} \cdot T$ <p>Для температур от T=1700° до T=3000° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 7,40 + 0,34 \cdot 10^{-3} \cdot T$ |
| N ₂ | <p>Для температур от T=300° до T=2200° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 6,74 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot T$ <p>Для температур от T=2200° до T=3000° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 7,05 + 0,35 \cdot 10^{-3} \cdot T$ |
| H ₂ | <p>Для температур от T=300° до T=3000° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 6,68 + 0,34 \cdot 10^{-3} \cdot T$ |
| CO | <p>Для температур от T=300° до T=2200° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 6,72 + 0,55 \cdot 10^{-3} \cdot T$ <p>Для температур от T=1800° до T=3000° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 7,07 + 0,37 \cdot 10^{-3} \cdot T$ |
| CO ₂ | <p>Для температур от T=300° до T=1000° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 6,495 + 3,85 \cdot 10^{-3} \cdot T$ <p>Для температур от T=1000° до T=2100° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 8,655 + 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot T$ <p>Для температур от T=1900° до T=3000° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 10,285 + 0,88 \cdot 10^{-3} \cdot T$ |

Продолжение табл. 11

| | |
|------------------|--|
| H ₂ O | <p>Для температур от T=300° до T=1300° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 7,535 + 1,02 \cdot 10^{-3} \cdot T$ <p>Для температур от T=1300° до T=3000° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 7,585 + 1,08 \cdot 10^{-3} \cdot T$ |
| CH ₄ | <p>Для температур от T=300° до T=600° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 7,01 + 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot T$ <p>Для температур от T=600° до T=1400° абс.</p> $\mu_{c_{p,m}} \int_0^T = 6,06 + 5,3 \cdot 10^{-3} \cdot T$ |

Таблица 11*

Средние объёмные теплоёмкости при постоянном давлении воздуха и газов от 0°C до t°C

в ккал/нм³ $\bar{c}_{p,m}$ °C по данным ВТИ [35]

| t | CO ₂ | N ₂ | O ₂ | H ₂ O | Воздух сухой | Воздух влажный α=10 г/кг |
|------|-----------------|----------------|----------------|------------------|--------------|--------------------------|
| 0 | 0,3805 | 0,3088 | 0,3116 | 0,3569 | 0,3093 | 0,3150 |
| 100 | 0,4092 | 0,3096 | 0,3145 | 0,3596 | 0,3106 | 0,3163 |
| 200 | 0,4290 | 0,3106 | 0,3190 | 0,3635 | 0,3123 | 0,3181 |
| 300 | 0,4469 | 0,3122 | 0,3240 | 0,3684 | 0,3147 | 0,3206 |
| 400 | 0,4628 | 0,3146 | 0,3291 | 0,3739 | 0,3175 | 0,3235 |
| 500 | 0,4769 | 0,3173 | 0,3339 | 0,3796 | 0,3207 | 0,3268 |
| 600 | 0,4895 | 0,3203 | 0,3385 | 0,3856 | 0,3241 | 0,3303 |
| 700 | 0,5008 | 0,3235 | 0,3426 | 0,3920 | 0,3275 | 0,3338 |
| 800 | 0,5110 | 0,3266 | 0,3464 | 0,3985 | 0,3307 | 0,3371 |
| 900 | 0,5204 | 0,3297 | 0,3498 | 0,4050 | 0,3338 | 0,3403 |
| 1000 | 0,5288 | 0,3325 | 0,3529 | 0,4115 | 0,3367 | 0,3433 |
| 1100 | 0,5363 | 0,3354 | 0,3548 | 0,4180 | 0,3396 | 0,3463 |
| 1200 | 0,5433 | 0,3380 | 0,3581 | 0,4244 | 0,3422 | 0,3490 |
| 1300 | 0,5495 | 0,3406 | 0,3608 | 0,4306 | 0,3448 | 0,3517 |
| 1400 | 0,5553 | 0,3430 | 0,3631 | 0,4367 | 0,3472 | 0,3542 |
| 1500 | 0,5606 | 0,3453 | 0,3653 | 0,4425 | 0,3494 | 0,3565 |
| 1600 | 0,5655 | 0,3473 | 0,3673 | 0,4482 | 0,3515 | 0,3587 |
| 1700 | 0,5701 | 0,3493 | 0,3693 | 0,4537 | 0,3534 | 0,3607 |
| 1800 | 0,5744 | 0,3511 | 0,3712 | 0,4590 | 0,3552 | 0,3625 |
| 1900 | 0,5783 | 0,3529 | 0,3730 | 0,4640 | 0,3570 | 0,3644 |
| 2000 | 0,5820 | 0,3545 | 0,3747 | 0,4689 | 0,3586 | 0,3661 |
| 2100 | 0,5855 | 0,3560 | 0,3764 | 0,4736 | 0,3602 | 0,3678 |
| 2200 | 0,5887 | 0,3574 | 0,3781 | 0,4780 | 0,3616 | 0,3693 |
| 2300 | 0,5919 | 0,3588 | 0,3796 | 0,4822 | 0,3631 | 0,3708 |
| 2400 | 0,5947 | 0,3601 | 0,3810 | 0,4864 | 0,3644 | 0,3722 |
| 2500 | 0,5974 | 0,3613 | 0,3825 | 0,4903 | 0,3657 | 0,3735 |

В табл. 12, 13, 14, 15 и 16 даны теплоёмкости жидких и твёрдых тел.

Средняя теплоёмкость воды c_m в интервале 0—100°C приблизительно равна теплоёмкости при 15°C — c_{15} .

По Политнер, при t = —35°C теплоёмкость ртути $c = 0,0350 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$; как среднее из разных наблюдений: при t = 0°C $c = 0,03333$, при t = 100°C $c = 0,03262$, при

$t = 200^{\circ}\text{C}$ $c = 0,03189$, т. е. теплоёмкость ртути убывает с повышением температуры; по Курбатову, минимум c между $200-250^{\circ}\text{C}$, по Barnes, — между $100-150^{\circ}\text{C}$; $c = 0,03336 - 0,000006 t$ (в пределах от 0 до 250°C).

Т а б л и ц а 12

Теплоёмкость воды [45]

| | Rowland | Griffiths | Callendar-Barnes | Jager-Stelnwehr |
|----------------------|---------|-----------|------------------|----------------------------|
| 10°C | 1,0019 | — | 1,0021 | $5^{\circ}\text{C}-1,0029$ |
| 11 | 1,0014 | — | 1,0016 | 10 —1,0013 |
| 12 | 1,0010 | — | 1,0011 | 15 —1,0000 |
| 13 | 1,0007 | 1,0006 | 1,0007 | 20 —1,9990 |
| 14 | 1,0003 | 1,0003 | 1,0003 | 25 —0,9983 |
| 15 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 30 —0,9979 |
| 16 | 0,9996 | 0,9997 | 0,9997 | 35 —0,9978 |
| 17 | 0,9993 | 0,9994 | 0,9994 | 40 —0,9981 |
| 18 | 0,9990 | 0,9991 | 0,9990 | 45 —0,9937 |
| 19 | 0,9986 | 0,9988 | 0,9988 | |
| 20 | 0,9983 | 0,9985 | 0,9985 | 50—0,9996 |
| 21 | 0,9981 | 0,9982 | 0,9983 | — |
| 22 | 0,9979 | 0,9979 | 0,9980 | — |
| 23 | 0,9976 | 0,9976 | 0,9977 | — |
| 24 | 0,9974 | 0,9973 | 0,9975 | — |
| 25 | 0,9972 | 0,9970 | 0,9974 | — |

П р и м е ч а н и е. По Regnault, $c = 1 + 0,00004t + 0,0000009 t^2$, однако позднейшие исследования дают минимум c при температурах от 20 до 40°C ; так, значения c , по Callendar и Barnes, для температур от 0 до 60° дают $c = 0,9982 + 0,0000045 (t-40)^2$ (минимум около 40°C).

Теплоёмкость воды при температурах ниже нуля (по Tommasini-Cardani до -10°C , по Martinetti до 6°C) увеличивается с понижением температуры на 1°C приблизительно на $0,0005$.

Т а б л и ц а 13

Средняя удельная теплоёмкость сжиженных газов [28]

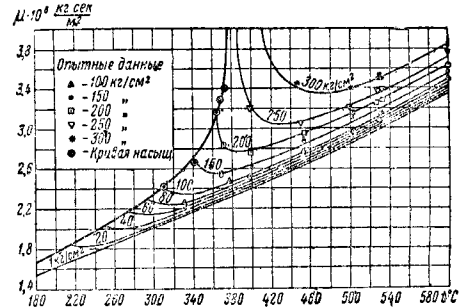
| Жидкость | Пределы в $^{\circ}\text{abs.}$ | ккал кг·град |
|--|---------------------------------|-----------------|
| Аммиак | 200—220 | 1,08 |
| Углекислый газ (при 63 ат.) | 223—263 | 0,465—0,539 |
| Оксид углерода | 67—83 | 0,0615 |
| Хлор | 68 | 0,229 |
| Водород | 15—21 | 1,75—2,33 |
| Азот | 64—76 | 0,475 |
| Оксид азота | 115—117 | 0,580 |
| Кислород | 57—73 | 0,398 |
| Сернистый ангидрид | 273 | 0,317 |

ВЯЗКОСТЬ

Внутреннее трение в реальных жидкостях — вязкость — является отличием реальной жидкости от идеальной. Под влиянием вязкости происходит видоизменение профиля

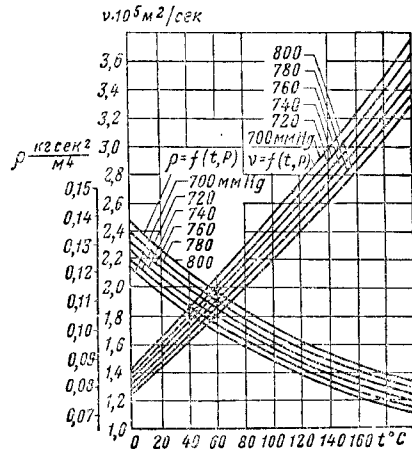
скоростей потока жидкости, набегающего на поверхность.

По кинетической теории газов $\mu = \frac{1}{3} \rho \cdot \omega \cdot l$, где ω — средняя скорость молекул; l — свобод-



Фиг. 2

ный пробег; так как l обратно пропорционально ρ , то по кинетической теории μ идеального газа не зависит от плотности, а следовательно, и давления, что частично — при средних давлениях — подтверждается опытом.



Фиг. 3

Основные формулы и данные, относящиеся к определению вязкости жидкости и газов, сил внутреннего трения, коэффициентов кинематической вязкости, см. ТСЖ, т. I, раздел «Гидромеханика».

Коэффициент вязкости перегретого водяного пара, по данным Д. Тимрот, приведен на фиг. 2 [44].

Т а б л и ц а 14

Средняя теплоёмкость c_m воды между 0° и $t^{\circ}\text{C}$ до Дитеричи

| $t =$ | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 220 | 240 | 260 | 280 | 300 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $c_m =$ | 1,0010 | 0,9973 | 0,9976 | 0,9985 | 1,0000 | 1,0020 | 1,0046 | 1,0077 | 1,0113 | 1,0155 | 1,0203 | 1,0256 | 1,0315 | 1,0380 | 1,0449 |

$$c_m = 0,9983 - 0,005184 \cdot \frac{t}{100} + 0,006912 \left(\frac{t}{100} \right)^2.$$

Таблица 15*

Истинная удельная теплоёмкость твёрдых тел выражена в $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$

| °C | Pb | Zn | Al | Ag | Au | Cu | Ni | Fe | Co | SiO ₂ |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|
| 0 | 0,0359 | 0,0878 | 0,2220 | 0,0573 | 0,0317 | 0,1008 | 0,1095 | 0,1055 | 0,0912 | — |
| 100 | 0,0336 | 0,0965 | 0,2297 | 0,0583 | 0,0321 | 0,1014 | 0,1200 | 0,1168 | 0,0993 | 0,2872 |
| 200 | 0,0313 | 0,1052 | 0,2374 | 0,0594 | 0,0322 | 0,1020 | 0,1305 | 0,1282 | 0,1073 | 0,2416 |
| 300 | 0,0290 | 0,1139 | 0,2451 | 0,0605 | 0,0325 | 0,1026 | 0,1400 | 0,1396 | 0,1154 | 0,2460 |
| 400 | 0,0266 | 0,1226 | 0,2529 | 0,0616 | 0,0328 | 0,1032 | 0,1294 | 0,1509 | 0,1235 | 0,2504 |
| 500 | 0,0259 | 0,1173 | 0,2606 | 0,0627 | 0,0330 | 0,1038 | 0,1294 | 0,1623 | 0,1316 | 0,2548 |
| 600 | 0,0252 | 0,1141 | 0,2683 | 0,0638 | 0,0333 | 0,1045 | 0,1294 | 0,1737 | 0,1396 | 0,2592 |
| 700 | 0,0246 | 0,1109 | 0,2523 | 0,0649 | 0,0335 | 0,1051 | 0,1295 | 0,1850 | 0,1477 | 0,2636 |
| 800 | 0,0239 | 0,1076 | 0,2571 | 0,0660 | 0,0338 | 0,1057 | 0,1295 | 0,1592 | 0,1558 | 0,2680 |
| 900 | 0,0233 | 0,1044 | 0,2619 | 0,0671 | 0,0341 | 0,1063 | 0,1295 | 0,1592 | 0,1639 | 0,2724 |
| 1000 | 0,0226 | 0,1012 | 0,2667 | 0,0687 | 0,0343 | 0,1069 | 0,1295 | 0,1448 | — | 0,2768 |
| 1100 | — | — | — | 0,0694 | 0,0329 | 0,1128 | 0,1296 | 0,1448 | 0,1424 | 0,2812 |
| 1200 | — | — | — | 0,0750 | 0,0346 | 0,1159 | 0,1296 | 0,1448 | 0,1454 | 0,2856 |
| 1300 | — | — | — | 0,0807 | 0,0364 | 0,1291 | 0,1296 | 0,1449 | 0,1483 | 0,2900 |
| 1400 | — | — | — | — | — | — | 0,1296 | 0,1449 | 0,1512 | 0,2944 |
| 1500 | — | — | — | — | — | — | 0,1338 | 0,2142 | 0,1472 | 0,2988 |
| 1600 | — | — | — | — | — | — | — | 0,1501 | 0,1472 | — |

* По Smithsonian Tables.

Таблица 16

Средняя удельная теплоёмкость в $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ твёрдых и капельно-жидких тел между 0 и 100° [46]

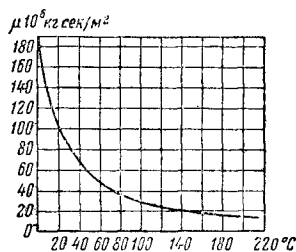
| | | | |
|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Азот (жидкий) 0,430 | Дерево (сосна) 0,65 | Марганец 0,12 | Сурьма 0,06 |
| Алюминий 0,22 | Древесный уголь 0,20 | Медь 0,094 | Свинец 0,031 |
| Аммиак 1,00 | Железо и сталь 0,115 | Машинное масло 0,40 | Стекло 0,20 |
| Анилин 0,49 | Зола 0,20 | Мраморный из- | Серная кислота 0,33 |
| Базальт 0,20 | Золото 0,031 | вестняк 0,21 | Серебро 0,056 |
| Бензол 0,44 | Каменный уголь 0,31 | Никель 0,11 | Сера 0,18 |
| Бетон 0,21 | Керосин 0,50 | Нафталин 0,31 | Скипидар 0,42 |
| Висмут 0,030 | Константан 0,098 | Олово 0,056 | Тантал 0,036 |
| Вольфрам 0,034 | Кирпич 0,22 | Оливковое масло 0,40 | Уксусная кислота 0,61 |
| Гипс 0,20 | Кислород жидкий 0,347 | Платина 0,032 | Хлороформ 0,23 |
| Глицерин 0,58 | Кокс 0,20 | Песчаник 0,22 | Цинк 0,094 |
| Гранит 0,20 | Латунь 0,092 | Первичная смола 0,5 | Шлаки 0,18 |
| Графит 0,20 | Лёд 0,50 | Ртуть 0,035 | Эфир 0,54 |
| Дерево (дуб) 0,57 | Магний 0,25 | Спирт 0,58 | |

Коэффициент кинематической вязкости ν в $\frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$ и плотность воздуха ρ в $\frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}^4}$ при различном барометрическом давлении и температуре см. фиг. 3 [22].

или

$$\frac{1}{\mu} = \frac{g_1}{\mu_1} + \frac{g_2}{\mu_2} + \dots$$

где μ , μ_1 , μ_2 . . . — динамические вязкости смеси и составляющих компонентов; ν , ν_1 ,



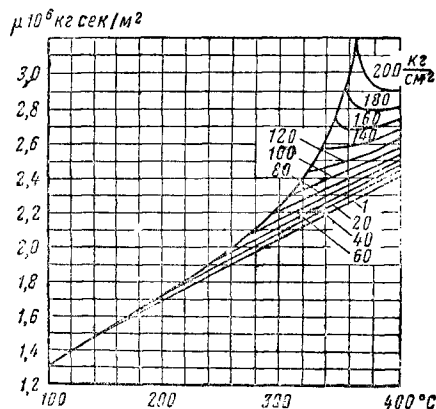
Фиг. 4

Работы Всесоюзного теплотехнического института (ВТИ) по вязкости водяного пара представлены в табл. 17 и 18; они опираются на определение вязкости методом капилляра (по вопросу несовпадения данных по методу капилляра и методу Лавачека смотри [44]).

Вязкость смесей находят по формуле Манна

$$\frac{1}{\nu} = \frac{r_1}{\nu_1} + \frac{r_2}{\nu_2} + \dots$$

ν_1 . . . — кинематические вязкости их; g_1 , g_2 . . . и r_1 , r_2 . . . — доли компонентов смеси по весу и объёму. Вязкости воды, водяного пара,



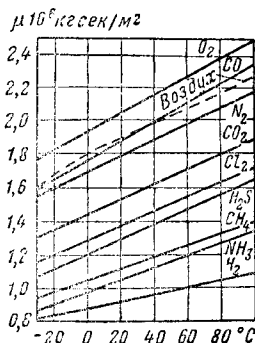
Фиг. 5

Т а б л и ц а 17
Динамическая вязкость водяного пара и воды
 $\mu \cdot 10^6 \text{ кг сек/м}^2$ [7]

| $t^\circ\text{C}$ | $\rho \text{ кг/см}^3$ | | | | | | | | | |
|-------------------|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| 100 | 1,23 | 28,8 | 28,9 | 29,0 | 29,1 | 29,3 | 29,6 | 30,0 | 30,4 | 31,0 |
| 110 | 1,27 | 25,9 | 26,0 | 26,1 | 26,2 | 26,4 | 26,7 | 27,0 | 27,5 | 27,8 |
| 120 | 1,30 | 23,5 | 23,6 | 23,7 | 23,8 | 24,0 | 24,3 | 24,6 | 25,1 | 25,3 |
| 130 | 1,34 | 21,6 | 21,7 | 21,8 | 21,9 | 22,1 | 22,4 | 22,7 | 23,1 | 23,4 |
| 140 | 1,38 | 20,1 | 20,2 | 20,3 | 20,5 | 20,6 | 20,8 | 21,1 | 21,5 | 21,8 |
| 150 | 1,42 | 18,8 | 18,9 | 19,0 | 19,2 | 19,4 | 19,5 | 19,8 | 20,1 | 20,4 |
| 160 | 1,47 | 17,6 | 17,7 | 17,8 | 18,0 | 18,1 | 18,3 | 18,5 | 18,8 | 19,1 |
| 170 | 1,51 | 16,6 | 16,7 | 16,7 | 16,9 | 17,0 | 17,2 | 17,3 | 17,6 | 17,9 |
| 180 | 1,54 | 15,7 | 15,8 | 15,8 | 15,9 | 16,0 | 16,2 | 16,3 | 16,5 | 16,8 |
| 190 | 1,58 | 14,9 | 14,9 | 15,0 | 15,1 | 15,1 | 15,3 | 15,4 | 15,6 | 15,8 |
| 200 | 1,62 | 14,1 | 14,1 | 14,2 | 14,3 | 14,3 | 14,5 | 14,6 | 14,8 | 14,9 |
| 210 | 1,66 | 13,4 | 13,4 | 13,5 | 13,6 | 13,7 | 13,8 | 13,9 | 14,0 | 14,2 |
| 220 | 1,69 | 1,82 | 12,8 | 12,9 | 12,9 | 13,0 | 13,1 | 13,2 | 13,3 | 13,5 |
| 230 | 1,73 | 1,82 | 12,2 | 12,3 | 12,3 | 12,4 | 12,5 | 12,6 | 12,7 | 12,9 |
| 240 | 1,77 | 1,82 | 11,7 | 11,8 | 11,8 | 11,9 | 12,0 | 12,1 | 12,2 | 12,3 |
| 250 | 1,81 | 1,84 | 2,03 | 11,3 | 11,3 | 11,4 | 11,5 | 11,6 | 11,7 | 11,8 |
| 260 | 1,85 | 1,87 | 2,00 | 10,8 | 10,9 | 10,9 | 11,0 | 11,1 | 11,2 | 11,3 |
| 270 | 1,89 | 1,91 | 1,99 | 10,4 | 10,4 | 10,5 | 10,6 | 10,7 | 10,8 | 10,9 |
| 280 | 1,93 | 1,95 | 2,00 | 2,13 | 10,0 | 10,1 | 10,2 | 10,3 | 10,4 | 10,5 |
| 290 | 1,97 | 1,99 | 2,02 | 2,13 | 9,7 | 9,7 | 9,8 | 10,0 | 10,1 | 10,2 |
| 300 | 2,00 | 2,03 | 2,06 | 2,13 | 2,27 | 9,4 | 9,5 | 9,6 | 9,7 | 9,9 |
| 310 | 2,04 | 2,07 | 2,09 | 2,15 | 2,24 | 2,41 | 9,2 | 9,3 | 9,4 | 9,6 |
| 320 | 2,08 | 2,11 | 2,13 | 2,17 | 2,23 | 2,35 | 8,8 | 9,0 | 9,1 | 9,3 |
| 330 | 2,12 | 2,14 | 2,17 | 2,20 | 2,24 | 2,33 | 8,4 | 8,6 | 8,7 | 9,0 |
| 340 | 2,16 | 2,18 | 2,21 | 2,24 | 2,27 | 2,34 | 7,9 | 8,1 | 8,3 | 8,6 |
| 350 | 2,20 | 2,22 | 2,25 | 2,28 | 2,31 | 2,36 | 2,57 | 7,5 | 7,8 | 8,2 |
| 360 | 2,24 | 2,26 | 2,29 | 2,32 | 2,35 | 2,39 | 2,54 | 6,9 | 7,4 | 7,7 |
| 370 | 2,28 | 2,30 | 2,33 | 2,36 | 2,39 | 2,42 | 2,55 | 2,34 | 6,7 | 7,2 |
| 380 | 2,32 | 2,34 | 2,37 | 2,40 | 2,43 | 2,46 | 2,58 | 2,78 | 5,4 | 6,6 |
| 390 | 2,36 | 2,38 | 2,41 | 2,44 | 2,47 | 2,50 | 2,61 | 2,77 | 3,4 | 5,7 |
| 400 | 2,40 | 2,42 | 2,45 | 2,48 | 2,51 | 2,54 | 2,64 | 2,79 | 3,2 | 4,6 |
| 410 | 2,44 | 2,47 | 2,49 | 2,52 | 2,55 | 2,58 | 2,67 | 2,81 | 3,1 | 3,9 |
| 420 | 2,48 | 2,51 | 2,53 | 2,56 | 2,59 | 2,62 | 2,71 | 2,84 | 3,0 | 3,7 |
| 430 | 2,53 | 2,55 | 2,58 | 2,60 | 2,63 | 2,66 | 2,75 | 2,88 | 3,0 | 3,5 |
| 440 | 2,57 | 2,59 | 2,62 | 2,64 | 2,67 | 2,70 | 2,79 | 2,91 | 3,1 | 3,4 |
| 450 | 2,61 | 2,63 | 2,66 | 2,68 | 2,71 | 2,74 | 2,83 | 2,94 | 3,1 | 3,4 |
| 460 | 2,65 | 2,67 | 2,70 | 2,73 | 2,75 | 2,78 | 2,87 | 2,98 | 3,1 | 3,4 |
| 470 | 2,70 | 2,71 | 2,75 | 2,78 | 2,80 | 2,83 | 2,91 | 3,02 | 3,1 | 3,3 |
| 480 | 2,75 | 2,76 | 2,80 | 2,82 | 2,85 | 2,87 | 2,96 | 3,06 | 3,2 | 3,3 |
| 490 | 2,79 | 2,81 | 2,84 | 2,87 | 2,89 | 2,92 | 3,00 | 3,10 | 3,2 | 3,4 |
| 500 | 2,84 | 2,86 | 2,89 | 2,92 | 2,94 | 2,97 | 3,05 | 3,14 | 3,3 | 3,4 |
| 510 | 2,89 | 2,91 | 2,94 | 2,96 | 2,99 | 3,02 | 3,10 | 3,19 | 3,3 | 3,4 |
| 520 | 2,94 | 2,96 | 2,99 | 3,01 | 3,04 | 3,07 | 3,15 | 3,24 | 3,4 | 3,5 |
| 530 | 2,99 | 3,01 | 3,04 | 3,06 | 3,09 | 3,12 | 3,20 | 3,28 | 3,4 | 3,5 |
| 540 | 3,04 | 3,06 | 3,09 | 3,11 | 3,15 | 3,17 | 3,25 | 3,33 | 3,4 | 3,6 |
| 550 | 3,09 | 3,12 | 3,14 | 3,16 | 3,20 | 3,23 | 3,30 | 3,38 | 3,5 | 3,6 |

газов по правилам № 169 по измерению расхода жидкостей газов и пара при помощи сопел и диафрагм (Главное управление мер и весов [39]) берутся из фиг. 4, 5, 6.

Вязкость жидкостей обычно определяется отношением $\frac{\mu}{\mu'} = \frac{t \cdot \rho}{t' \cdot \rho'}$, где μ и μ' — коэффициенты вязкости испытуемой жидкости и воды; ρ и ρ' — плотности их; t и t' — время истечения одинаковых объемов жидкости и воды при одинаковых условиях через одну и ту же испытательную трубку (вискозиметр). Абсолютная величина μ находится пересчетом, так как значения μ' известны. Свойства газов см. табл. 20.



Фиг. 6

Физические константы воды между 0 и 200°C при давлении насыщения (между 0 и 100° при давлении 1 кг/см²) см. табл. 21.

В пределах небольших давлений μ жидкостей меняется с давлением линейно. Влияние высоких давлений см. [5].

Качественное поведение исследованных жидкостей, исключая воду, под воздействием высоких давлений одинаково, количественное изменение вязкости весьма различно.

Вязкость увеличивается с повышением давления, темп нарастания вязкости растёт с повышением давления: для первых двух-трёх тысяч кг/см² соотношение между давлением и вязкостью почти линейное; выше 3000 кг/см² вязкость растёт или в геометрической прогрессии или ещё быстрее, тогда как давление растёт лишь в арифметической прогрессии.

За исключением воды и ртути наименьшее влияние давления на вязкость у метилового спирта (при увеличении давления до 12000 кг/см² вязкость увеличивается лишь в 10 раз), у эйгенола — наибольшее (при увеличении давления до 12000 кг/см² вязкость растёт в 10⁷ раз).

По Гайду, смазочные масла при давлениях до 1500 кг/см² увеличивают вязкость более чем в 15 раз. Герш и Шор обнаруживают увеличение вязкости смазочных масел в сотни раз при повышении давления до 4000 кг/см². Цифровые измерения вязкости Бриджмен даёт в сводке, где приведены логарифмы относительной вязкости при различных температурах и давлениях; вязкость исследуемой жидкости при атмосферном давлении и 30°C принимается за единицу (табл. 19).

Кинематическая вязкость водяного пара и воды $\nu \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{сек}$ [7]

| $t^\circ\text{C}$ | $p \text{ кг/см}^2$ | | | | | | | | | |
|-------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| 100 | 20,9 | 0,295 | 0,295 | 0,297 | 0,298 | 0,299 | 0,301 | 0,304 | 0,308 | 0,313 |
| 110 | 22,2 | 0,267 | 0,268 | 0,269 | 0,269 | 0,271 | 0,273 | 0,276 | 0,280 | 0,283 |
| 120 | 23,4 | 0,244 | 0,245 | 0,245 | 0,247 | 0,248 | 0,251 | 0,254 | 0,258 | 0,260 |
| 130 | 24,7 | 0,225 | 0,227 | 0,228 | 0,229 | 0,230 | 0,233 | 0,236 | 0,240 | 0,242 |
| 140 | 26,1 | 0,213 | 0,214 | 0,215 | 0,216 | 0,217 | 0,219 | 0,221 | 0,225 | 0,227 |
| 150 | 27,6 | 0,201 | 0,202 | 0,204 | 0,205 | 0,206 | 0,207 | 0,208 | 0,212 | 0,215 |
| 160 | 29,1 | 0,190 | 0,191 | 0,192 | 0,194 | 0,195 | 0,196 | 0,198 | 0,200 | 0,202 |
| 170 | 30,6 | 0,182 | 0,182 | 0,182 | 0,184 | 0,185 | 0,186 | 0,187 | 0,189 | 0,191 |
| 180 | 32,1 | 0,174 | 0,174 | 0,174 | 0,175 | 0,176 | 0,177 | 0,178 | 0,180 | 0,181 |
| 190 | 33,6 | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 0,168 | 0,168 | 0,169 | 0,171 | 0,172 | 0,172 |
| 200 | 35,2 | 0,160 | 0,160 | 0,161 | 0,161 | 0,162 | 0,163 | 0,163 | 0,165 | 0,165 |
| 210 | 36,8 | 0,154 | 0,154 | 0,155 | 0,155 | 0,156 | 0,157 | 0,157 | 0,158 | 0,159 |
| 220 | 38,4 | 1,86 | 0,149 | 0,150 | 0,150 | 0,151 | 0,151 | 0,152 | 0,152 | 0,154 |
| 230 | 40,0 | 1,92 | 0,145 | 0,145 | 0,145 | 0,146 | 0,147 | 0,147 | 0,147 | 0,149 |
| 240 | 41,7 | 1,98 | 0,141 | 0,141 | 0,141 | 0,142 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,144 |
| 250 | 43,5 | 2,05 | 1,01 | 0,138 | 0,138 | 0,139 | 0,139 | 0,139 | 0,139 | 0,140 |
| 260 | 45,4 | 2,14 | 1,04 | 0,135 | 0,136 | 0,136 | 0,136 | 0,136 | 0,136 | 0,136 |
| 270 | 47,2 | 2,24 | 1,07 | 0,133 | 0,133 | 0,133 | 0,133 | 0,133 | 0,133 | 0,133 |
| 280 | 49,1 | 2,34 | 1,11 | 0,129 | 0,131 | 0,131 | 0,131 | 0,131 | 0,131 | 0,131 |
| 290 | 51,0 | 2,44 | 1,16 | 0,128 | 0,129 | 0,129 | 0,129 | 0,130 | 0,13 | 0,13 |
| 300 | 52,9 | 2,55 | 1,22 | 0,128 | 0,128 | 0,128 | 0,128 | 0,128 | 0,13 | 0,13 |
| 310 | 54,8 | 2,65 | 1,27 | 0,127 | 0,128 | 0,128 | 0,128 | 0,128 | 0,13 | 0,13 |
| 320 | 56,8 | 2,76 | 1,32 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,13 | 0,13 |
| 330 | 58,9 | 2,86 | 1,38 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,13 | 0,13 |
| 340 | 61,0 | 2,95 | 1,44 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,126 | 0,12 | 0,13 |
| 350 | 63,2 | 3,07 | 1,50 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,123 | 0,12 | 0,12 |
| 360 | 65,4 | 3,19 | 1,55 | 1,01 | 0,730 | 0,563 | 0,325 | 0,175 | 0,12 | 0,12 |
| 370 | 67,6 | 3,31 | 1,62 | 1,05 | 0,765 | 0,590 | 0,332 | 0,210 | 0,12 | 0,12 |
| 380 | 69,8 | 3,42 | 1,68 | 1,09 | 0,798 | 0,618 | 0,375 | 0,240 | 0,14 | 0,12 |
| 390 | 72,1 | 3,54 | 1,74 | 1,14 | 0,832 | 0,647 | 0,397 | 0,262 | 0,16 | 0,13 |
| 400 | 74,4 | 3,66 | 1,80 | 1,18 | 0,865 | 0,675 | 0,418 | 0,283 | 0,19 | 0,14 |
| 410 | 76,8 | 3,79 | 1,86 | 1,22 | 0,899 | 0,704 | 0,440 | 0,303 | 0,21 | 0,16 |
| 420 | 79,3 | 3,92 | 1,93 | 1,27 | 0,934 | 0,732 | 0,462 | 0,322 | 0,23 | 0,19 |
| 430 | 81,9 | 4,05 | 2,00 | 1,31 | 0,968 | 0,761 | 0,483 | 0,341 | 0,25 | 0,20 |
| 440 | 84,4 | 4,17 | 2,07 | 1,36 | 1,00 | 0,790 | 0,505 | 0,359 | 0,27 | 0,22 |
| 450 | 87,0 | 4,30 | 2,13 | 1,40 | 1,04 | 0,819 | 0,526 | 0,377 | 0,29 | 0,23 |
| 460 | 89,7 | 4,43 | 2,20 | 1,45 | 1,07 | 0,849 | 0,548 | 0,395 | 0,30 | 0,24 |
| 470 | 92,5 | 4,57 | 2,27 | 1,50 | 1,11 | 0,880 | 0,570 | 0,413 | 0,31 | 0,25 |
| 480 | 95,4 | 4,72 | 2,35 | 1,55 | 1,15 | 0,911 | 0,593 | 0,431 | 0,33 | 0,26 |
| 490 | 98,3 | 4,87 | 2,42 | 1,60 | 1,19 | 0,943 | 0,615 | 0,448 | 0,35 | 0,28 |
| 500 | 101,3 | 5,02 | 2,50 | 1,66 | 1,23 | 0,976 | 0,638 | 0,466 | 0,37 | 0,29 |
| 510 | 104,4 | 5,18 | 2,58 | 1,71 | 1,27 | 1,01 | 0,662 | 0,485 | 0,38 | 0,30 |
| 520 | 107,6 | 5,34 | 2,66 | 1,76 | 1,31 | 1,04 | 0,686 | 0,504 | 0,40 | 0,32 |
| 530 | 110,8 | 5,50 | 2,74 | 1,82 | 1,36 | 1,08 | 0,710 | 0,522 | 0,41 | 0,33 |
| 540 | 114,0 | 5,67 | 2,83 | 1,87 | 1,40 | 1,11 | 0,735 | 0,541 | 0,42 | 0,35 |
| 550 | 117,3 | 5,85 | 2,91 | 1,93 | 1,45 | 1,15 | 0,759 | 0,561 | 0,44 | 0,36 |

Таблица 19

Вязкость жидкостей по Бриджмену [5]

| Вещество | | Давление в кг/см ² | | | | | $\frac{\mu_{30}}{\mu_{75}}$ в пуазах |
|------------------------|--|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---|
| | | 1 | 100 | 400 | 900 | 12 000 | |
| Метиловый спирт | $\lg \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} 30^\circ \\ 75^\circ \end{cases}$ | 0,000 9,769 | 0,167 9,933 | 0,471 0,208 | 0,750 0,448 | 0,998 0,655 | 0,00520 |
| | $\frac{\mu_{30}}{\mu_{75}}$ | 1,702 | 1,714 | 1,832 | 2,004 | 2,203 | — |
| Этиловый спирт | $\lg \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} 30^\circ \\ 75^\circ \end{cases}$ | 0,000 9,657 | 0,200 9,873 | 0,617 0,289 | 1,023 0,634 | 1,390 0,919 | 0,01003 |
| | $\frac{\mu_{30}}{\mu_{75}}$ | 2,203 | 2,123 | 2,128 | 2,449 | 2,958 | — |
| Пропиловый спирт норм. | $\lg \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} 30^\circ \\ 75^\circ \end{cases}$ | 0,000 9,598 | 0,283 9,880 | 0,836 0,363 | 1,402 0,827 | 1,915 1,223 | 0,01779 |
| | $\frac{\mu_{30}}{\mu_{75}}$ | 2,523 | 2,529 | 2,938 | 3,753 | 4,920 | — |
| Пентан норм. | $\lg \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} 30^\circ \\ 75^\circ \end{cases}$ | 0,000 9,811 | 0,315 0,163 | 0,847 0,676 | 1,360 1,119 | 1,845 1,493 | 0,00220 |
| | $\frac{\mu_{30}}{\mu_{75}}$ | 1,545 | 1,419 | 1,483 | 1,742 | 2,254 | — |
| Гексан норм. | $\lg \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} 30^\circ \\ 75^\circ \end{cases}$ | 0,000 9,803 | 0,332 0,171 | 0,914 0,701 | 1,514 1,193 | 1,646 | 0,00296 |
| | $\frac{\mu_{30}}{\mu_{75}}$ | 1,574 | 1,449 | 1,633 | 2,070 | — | — |
| Октан норм. | $\lg \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} 30^\circ \\ 75^\circ \end{cases}$ | 0,000 9,810 | 0,327 0,153 | 1,088 0,763 | 1,363 | — | 0,00483 |
| | $\frac{\mu_{30}}{\mu_{75}}$ | 1,549 | 1,493 | 2,113 | — | — | — |
| Глицерин | $\lg \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} 30^\circ \\ 75^\circ \end{cases}$ | 0,000 9,810 | 0,260 9,023 | 0,936 9,529 | 1,741 0,691 | 0,628 | 3,8 |
| | $\frac{\mu_{30}}{\mu_{75}}$ | 15,49 | 17,26 | 25,53 | 44,36 | — | — |
| Хлороформ | $\lg \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} 30^\circ \\ 75^\circ \end{cases}$ | 0,000 9,853 | 0,211 0,094 | 0,660 0,480 | 0,914 | — | 0,00519 |
| | $\frac{\mu_{30}}{\mu_{75}}$ | 1,387 | 1,300 | 1,514 | — | — | — |
| Серовуглерод | $\lg \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} 30^\circ \\ 75^\circ \end{cases}$ | 0,000 9,875 | 0,166 0,051 | 0,509 0,372 | 0,840 0,671 | 1,189 0,946 | 0,00352 |
| | $\frac{\mu_{30}}{\mu_{75}}$ | 1,334 | 1,285 | 1,371 | 1,476 | 1,750 | — |
| Эфир | $\lg \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} 30^\circ \\ 75^\circ \end{cases}$ | 0,000 9,878 | 0,324 0,149 | 0,792 0,601 | 1,261 0,986 | 1,670 1,311 | 0,00212 |
| | $\frac{\mu_{30}}{\mu_{75}}$ | 1,324 | 1,496 | 1,552 | 1,884 | 2,286 | — |
| Толуол | $\lg \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} 30^\circ \\ 75^\circ \end{cases}$ | 0,000 9,796 | 0,274 0,065 | 0,897 0,597 | 1,690 1,186 | 1,832 | 0,00523 |
| | $\frac{\mu_{30}}{\mu_{75}}$ | 1,600 | 1,618 | 1,995 | 3,258 | — | — |

Продолжение табл. 19

| Вещество | | | Давление в кг/см ² | | | | | μ_{20} в пуазах |
|------------------|--|-----------------------------|-------------------------------|-------|-----------------|-------|--------|------------------------|
| | | | 1 | 1000 | 4000 | 8000 | 12 000 | |
| Эйгенол | $\lg \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} 30^\circ \\ 75^\circ \end{cases}$ | $\frac{\mu_{20}}{\mu_{75}}$ | 0,000 | 0,541 | 2,273 | | | |
| | | | 9,429 | 9,810 | (3000) 0,805 | 2,343 | — | — |
| | | | 3,724 | 5,333 | —9,33 | — | — | — |
| Петролейный эфир | $\lg \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} 30^\circ \\ 75^\circ \end{cases}$ | $\frac{\mu_{20}}{\mu_{75}}$ | 0,00 | 0,3 | 0,93 | 1,59 | 2,18 | — |
| | | | — | — | 0,56 | 1,06 | 1,49 | — |
| | | | — | — | 2,34 | 3,39 | 4,90 | — |
| Керосин | $\lg \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} 30^\circ \\ 75^\circ \end{cases}$ | $\frac{\mu_{20}}{\mu_{75}}$ | 0,00 | 0,46 | 1,71 | 1,88 | 2,80 | — |
| | | | — | — | 0,91 | — | — | — |
| | | | — | — | 4,3 | — | — | — |

Таблица 20

Свойства газов [39]

| Наименование газа | Формула газа | Вес единицы объёма γ при | | Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^6 \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}$ при $t^\circ \text{C}$ | | | | | | |
|-------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---|------|------|-------|-------|-------|--|
| | | 0° и 760 мм рт. ст. | 20°C и 1 кг/см ² | — 30 | 0 | + 50 | + 100 | + 200 | + 300 | |
| | | | | | | | | | | |
| Воздух | — | 1,293 | 1,165 | 1,59 | 1,77 | 2,04 | 2,27 | 2,65 | 3,03 | |
| Кислород | O ₂ | 1,429 | 1,283 | 1,77 | 1,94 | 2,22 | 2,51 | 3,06 | — | |
| Азот | N ₂ | 1,250 | 1,126 | 1,55 | 1,70 | 1,94 | 2,17 | 2,57 | — | |
| Водород | H ₂ | 0,0899 | 0,0809 | 0,82 | 0,89 | 0,99 | 1,09 | 1,26 | 1,42 | |
| Хлор | Cl ₂ | 3,220 | 2,900 | 1,16 | 1,28 | 1,50 | 1,72 | — | — | |
| Оксид углерода | CO | 1,250 | 1,126 | 1,58 | 1,76 | 2,04 | — | — | — | |
| Углекислый газ | CO ₂ | 1,977 | 1,783 | 1,30 | 1,44 | 1,66 | 1,89 | 2,32 | — | |
| Сернистый газ | SO ₂ | 2,927 | 2,639 | 1,04 | 1,19 | 1,43 | 1,66 | 2,11 | — | |
| Сероводород | H ₂ S | 1,539 | 1,387 | 1,07 | 1,20 | 1,42 | 1,64 | — | — | |
| Аммиак | NH ₃ | 0,771 | 0,695 | 0,85 | 0,94 | 1,15 | 1,34 | — | — | |
| Метан | CH ₄ | 0,717 | 0,646 | 0,95 | 1,05 | 1,22 | 1,40 | — | — | |
| Ацетилен | C ₂ H ₂ | 1,171 | 1,056 | — | 0,96 | — | — | — | — | |
| Этилен | C ₂ H ₄ | 1,260 | 1,137 | 0,85 | 0,97 | 1,15 | 1,31 | 1,61 | 1,86 | |
| Этан | C ₂ H ₆ | 1,356 | 1,223 | 0,79 | 0,88 | 1,02 | — | — | — | |
| Водяной пар | H ₂ O | 1,257* | 1,133 | — | — | — | — | — | — | |

* Только расчётная величина

Таблица 21

Физические константы воды между 0 и 200°C при давлении насыщения (между 0 и 100° при давлении 1 кгс/см²) [13]

| Температура t | Давление p | Удельный вес γ | Удельная теплоёмкость c_p | Теплопроводность λ | Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^6$ | Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6$ | Температуропроводность $a \cdot 10^4$ | Критерий Прандтля Pr |
|--------------------|--------------------|--------------------------|---|---|---|---|--|---------------------------|
| t | p | γ | c_p | λ | $\mu \cdot 10^6$ | $\nu \cdot 10^6$ | $a \cdot 10^4$ | Pr |
| °C | кг/см ² | кг/м ³ | $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ | $\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ | $\frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}$ | $\frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$ | $\frac{\text{м}^2}{\text{час}}$ | |
| 0 | 1 | 1000 | 1,009 | 0,480 | 182,5 | 179 | 4,8 | 13,3 |
| 10 | 1 | 1000 | 1,002 | 0,494 | 133,0 | 130 | 5,0 | 9,49 |
| 20 | 1 | 998 | 0,999 | 0,510 | 102,0 | 100 | 5,1 | 7,06 |
| 30 | 1 | 996 | 0,998 | 0,525 | 81,7 | 80,5 | 5,3 | 5,51 |
| 40 | 1 | 992 | 0,998 | 0,539 | 66,6 | 65,9 | 5,4 | 4,37 |
| 50 | 1 | 988 | 0,999 | 0,552 | 56,0 | 55,6 | 5,6 | 3,59 |
| 60 | 1 | 983 | 0,999 | 0,565 | 48,0 | 47,9 | 5,7 | 3,00 |
| 70 | 1 | 978 | 1,001 | 0,574 | 41,4 | 41,5 | 5,9 | 2,54 |
| 80 | 1 | 972 | 1,002 | 0,581 | 36,3 | 36,6 | 6,0 | 2,20 |
| 90 | 1 | 965 | 1,005 | 0,585 | 32,1 | 32,6 | 6,1 | 1,93 |
| 100 | 1,03 | 958 | 1,007 | 0,587 | 28,8 | 29,5 | 6,2 | 1,72 |
| 120 | 2,02 | 943 | 1,015 | 0,590 | 23,5 | 24,4 | 6,4 | 1,37 |
| 140 | 3,68 | 926 | 1,025 | 0,588 | 20,0 | 21,2 | 6,5 | 1,17 |
| 160 | 6,30 | 908 | 1,040 | 0,585 | 17,5 | 18,9 | 6,7 | 1,02 |
| 180 | 10,20 | 887 | 1,057 | 0,579 | 15,7 | 17,4 | 6,9 | 0,91 |
| 200 | 15,85 | 865 | 1,078 | 0,572 | 14,3 | 16,2 | 7,1 | 0,82 |

Изменения вязкости ртути относительно невелики.

Вязкость ртути см. табл. 22.

Таблица 22

Вязкость ртути под давлением [5]

| Давление в кг/см^2 | Абсолютная вязкость | |
|-----------------------------|---------------------|---------|
| | 30°C | 75°C |
| 1 | 0,01516 | 0,01340 |
| 2 000 | 0,01585 | 0,01407 |
| 4 000 | 0,01663 | 0,01463 |
| 6 000 | 0,01742 | 0,01526 |
| 8 000 | 0,01822 | 0,01598 |
| 10 000 | 0,01912 | 0,01674 |
| 12 000 | 0,02007 | 0,01759 |

Таблица 23

Относительная вязкость воды [5]

| Давление в кг/см^2 | Относительная вязкость | | | |
|-----------------------------|------------------------|------------|-------|-------|
| | 0°C | 10,3°C | 30°C | 75°C |
| 1 | 1,000 | 0,779 | 0,488 | 0,222 |
| 500 | 0,938 | 0,775 | 0,500 | 0,230 |
| 1 000 | 0,921 | 0,743 | 0,514 | 0,239 |
| 1 500 | 0,932 | 0,745 | 0,530 | 0,247 |
| 2 000 | 0,957 | 0,754 | 0,550 | 0,258 |
| 3 000 | 1,024 | 0,791 | 0,599 | 0,278 |
| 4 000 | 1,111 | 0,842 | 0,658 | 0,302 |
| 5 000 | 1,218 | 0,903 | 0,740 | 0,338 |
| 6 000 | 1,347 | 0,981 | 0,796 | 0,367 |
| 7 000 | ... | 1,064 | 0,854 | 0,404 |
| 8 000 | ... | 1,152 | 0,923 | 0,445 |
| 9 000 | ... | ... | 0,986 | 0,494 |
| 10 000 | ... | Затвердела | 1,058 | ... |
| 11 000 | ... | ... | 1,126 | ... |

По Гаузеру, вязкость воды при температуре ниже 30° с увеличением давления до 400 кг/см^2 понижается, выше 30°C—увеличивается.

Бриджмен при $t = 0^\circ\text{C}$ и давлении 1 000 кг/см^2 находит минимум; при 30 и 75°C установлено увеличение вязкости на всём интервале увеличения давления.

Относительную вязкость воды см. в табл. 23.

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Молекулы жидкости на границе между жидкостью и другой средой (воздухом, паром этой жидкости, стенками сосуда) образуют поверхностный слой. Внутри жидкости молекула испытывает со стороны окружающих её молекул воздействие, одинаковое во всех направлениях; в поверхностном слое воздействия на молекулы со стороны жидкости и другой граничащей среды неодинаковы, равнодействующая всех сил направлена по нормали к поверхности пограничного слоя и зависит от свойств не только жидкости, но и другой среды. Молекулы слоя обладают большей потенциальной и свободной энергией, нежели молекулы внутри жидкости. Естественное стремление системы перейти к состоянию, отвечающему минимуму свободной энергии (по второму началу термодинамики), удовлетворяется выходом молекул из поверхностного во внутренние слои

жидкости, что вызывает тенденцию сокращения слоя и создаёт в нём поверхностное натяжение.

Коэффициент поверхностного натяжения α определяется либо как касательная к поверхности сила, отнесённая к 1 см линии раздела поверхности, либо как свободная энергия квадратного сантиметра поверхностного слоя ($\alpha \text{ эрг/см}^2 = \text{дн} \cdot \text{см/см}^2 = \text{дн/см}$).

Стандартная жидкость для определения поверхностного натяжения—вода (на границе с воздухом), для неё при 18°C $\alpha = 72,5$ —74,0, в среднем 73,1 дн/см .

Поверхностное натяжение воды является наибольшим (табл. 24).

Повышение температуры снижает α .

При критической температуре α на границе с насыщенным паром жидкости равно нулю. Поверхностное натяжение слоя оказывает на жидкость нормальное к её поверхности давление (см. стр. 343).

Таблица 24

Поверхностное натяжение α жидкостей [40]

| Вещество | t°C | α в дн/см | Вещество | t°C | α в дн/см |
|---|--------|---------------------------|-----------------------|--------|---------------------------|
| Вода . . . | 18 | 73,1 | He . . . | -269,9 | 0,098 |
| Бензол . . . | 20 | 28,8 | H ₂ . . . | -258,5 | 2,86 |
| Толуол . . . | 20 | 23,2 | H ₂ . . . | -253 | 1,91 |
| CS ₂ . . . | 20 | 33,5 | N ₂ . . . | -185,9 | 8,3 |
| CCl ₄ . . . | 20 | 25,7 | O ₂ . . . | -182,7 | 13 |
| CHCl ₃ . . . | 20 | 26 | Ar . . . | -186,1 | 11 |
| C ₆ H ₅ NH ₂ . . . | 0 | 45,4 | Cl ₂ . . . | -72 | 33,6 |
| CH ₃ OH . . . | 20 | 23,02 | Br ₂ . . . | + 13 | 44,1 |
| C ₂ H ₅ OH . . . | 20 | 22,3 | CO . . . | -190 | 11 |
| (C ₂ H ₅) ₂ O . . . | 20 | 16,5 | CO ₂ . . . | + 15,2 | 1,8 |
| CH ₃ COCH ₃ . . . | 16,8 | 23,4 | NH ₃ . . . | - 29 | 41,8 |
| CH ₃ COOH . . . | 20 | 23,5 | SO ₂ . . . | - 25 | 33,3 |
| He . . . | -270,7 | 0,354 | SO ₂ . . . | + 20 | 30 |

ТЕРМИЧЕСКИЕ КОЭФИЦИЕНТЫ

В случае однородного тела состояние его определяется давлением p , удельным объёмом v и температурой t . При наличии внутреннего равновесия эти параметры могут быть связаны функциональной зависимостью — так называемым уравнением состояния $F(p, v, t) = 0$; если $F(p, v, t)$ известно, то каждый из трёх параметров может рассматриваться как функция двух других независимых, и для определения состояния достаточно двух параметров:

$$p = f_1(t, v) \text{ и } dp = \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_v dt + \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_t dv;$$

$$v = f_2(t, p) \text{ и } dv = \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_p dt + \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_t dp;$$

$$t = f_3(p, v) \text{ и } dt = \left(\frac{\partial t}{\partial p}\right)_v dp + \left(\frac{\partial t}{\partial v}\right)_p dv;$$

входящие сюда частные производные связаны соотношением

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_v \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial v}\right)_p \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_t = -1.$$

Эти производные, давая изменение одного из параметров в функции другого при неизменности третьего, имеют значение для оценки физических свойств тела:

$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_p$ — расширяемость тела под влиянием изменения температуры при неизменном давлении;

$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_t$ — сжимаемость тела под влиянием изменения давления при неизменности температуры;

$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_v$ — упругость тела под влиянием температуры при неизменности объёма.

В термодинамике рассматриваются функции состояния:

$\alpha = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_p$ — термодинамический коэффициент расширения;

$\beta = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_t$ — термодинамический коэффициент сжатия;

$\sigma = \frac{1}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_v$ — термодинамический коэффициент давления.

В технических расчётах и экспериментальной физике часто пользуются величинами:

$\alpha_0 = \frac{1}{v_0} \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_p$ — коэффициент расширения;

$\alpha'_0 = \frac{1}{v_0} \cdot \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$ — средний коэффициент расширения;

$\beta_0 = -\frac{1}{v_0} \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_t$ — коэффициент сжатия;

$\beta'_0 = \frac{1}{v_0} \cdot \frac{v_1 - v_2}{p_2 - p_1}$ — средний коэффициент сжатия;

$\alpha'_0 = \frac{1}{p_0} \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_v$ — коэффициент давления;

$\sigma'_0 = \frac{1}{p_0} \cdot \frac{p_2 - p_1}{t_2 - t_1}$ — средний коэффициент давления;

коэффициенты α , β , σ — функции состояния и отличны от величин α_0 , β_0 , σ_0 ; так, для идеального газа уравнение состояния

$$p \cdot v = R \cdot T$$

и

$$\alpha = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{1}{v} \cdot \frac{R}{p} = \frac{1}{T},$$

тогда как

$$\alpha_0 = \frac{1}{v_0} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{1}{v_0} \cdot \frac{R}{p} = \frac{1}{v_0} \cdot \frac{v}{T} = \frac{T}{T_0} \cdot \frac{1}{T} = \frac{1}{273},$$

где v_0 при $T_0 = 273$ (табл. 25).

Для идеального газа

$$\alpha_0 = \sigma_0 = \frac{1}{273}.$$

Таблица 25

Термические коэффициенты газов при 1 ат [40]

| Газ | α'_0 | σ'_0 |
|----------------------|-------------|-------------|
| He | 0,0036582 | 0,0036606 |
| H ₂ | 0,0036588 | 0,0036621 |
| N ₂ | 0,0036733 | 0,0036746 |
| воздуха (при 1 м Нг) | 0,0036723 | 0,0036744 |

Для твёрдых тел имеют значение коэффициенты линейного ($\alpha_{0,l}$) и поверхностного ($\alpha_{0,s}$) расширения (табл. 26).

Для изотропных и квазиизотропных твёрдых тел приближённо $\alpha_0 = 3\alpha_{0,l}$, $\alpha_{0,s} = 2\alpha_{0,l}$.

Таблица 26

Линейное расширение твёрдых тел между 0° и t° в мм; отнесено к 1 м длины при 0° [46]

| Твёрдое тело | 0 до -190° | 0 до 100° | 0 до 200° | 0 до 300° | 0 до 400° | 0 до 500° | 0 до 600° | 0 до 700° |
|-----------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Алюминий | -3,43 | 2,38 | 4,94 | 7,68 | 10,60 | 13,70 | 16,67 | — |
| Берлинский фарфор | -0,32 | 0,30 | 0,66 | 1,03 | 1,41 | 1,82 | 2,24 | 2,63 |
| Бронза | -2,84 | 1,75 | 3,53 | 5,50 | 7,51 | 9,61 | — | — |
| Золото | -2,49 | 1,42 | — | — | — | — | — | — |
| Иенское стекло 16Ш | -1,12 | 0,81 | 1,67 | 2,60 | 3,59 | 4,63 | — | — |
| То же 59Ш | -0,82 | 0,56 | 1,20 | 1,83 | 2,47 | 3,12 | — | — |
| » » 1565Ш | — | 0,345 | 0,72 | 1,12 | 1,56 | 2,02 | — | — |
| Константан | -2,26 | 1,52 | 3,12 | 4,81 | 6,57 | 8,41 | — | — |
| Латунь | -3,11 | 1,84 | 3,85 | 6,03 | 8,39 | — | — | — |
| Литое железо | -1,67 | 1,20 | 2,51 | 3,92 | 5,44 | 7,06 | 8,79 | 10,63 |
| Литая сталь | -1,64 | 1,17 | 2,45 | 3,83 | 5,31 | 6,91 | 8,60 | 10,40 |
| Магний | -4,01 | 2,59 | 5,39 | 8,36 | 11,53 | 14,88 | — | — |
| Машинный чугун | -1,61 | 1,04 | 2,19 | 3,45 | 4,82 | 6,31 | 7,91 | — |
| Медь красная | -2,66 | 1,65 | 3,38 | 5,18 | 7,07 | 9,04 | 11,09 | — |
| Никель | -1,89 | — | — | 4,34 | 5,91 | 7,56 | 9,27 | 11,05 |
| Олово | -4,24 | 2,67 | — | — | — | — | — | — |
| Палладий | -1,93 | 1,19 | 2,42 | 3,70 | 5,02 | 6,38 | 7,79 | 9,24 |
| Платина | -1,51 | 0,90 | 1,83 | 2,78 | 3,76 | 4,77 | 5,80 | 6,86 |
| Платино-иридий 30:20% | -1,43 | 0,83 | 1,70 | 2,58 | 3,51 | 4,45 | 5,43 | 6,43 |
| Сварочное железо | -1,68 | 1,22 | 2,53 | 3,93 | 5,43 | 7,02 | 8,71 | 10,49 |
| Спинец | -5,12 | 2,92 | — | — | — | — | — | — |
| Стекло кварцевое | 0,0 | 0,05 | 0,12 | 0,19 | 0,25 | 0,31 | 0,36 | 0,40 |
| Серебро | -3,21 | 1,97 | 4,00 | 6,03 | 8,23 | 10,43 | 12,69 | 15,14 |
| Цинк | -1,85 | 1,65 | — | — | — | — | — | — |
| Чугун высокого качества | -1,59 | 1,04 | 2,21 | 3,49 | 4,90 | 6,44 | 8,09 | 9,87 |

Средний коэффициент линейного расширения от 0 до 100°C имеет значения порядка 10^{-5} , например [40]:

| $\alpha_0, 1$ | $\alpha_0, 1$ |
|---|--|
| $S_{10-20^\circ} \dots 7,07 \cdot 10^{-5}$ | $Pb_{17-100^\circ} \dots 2,93 \cdot 10^{-5}$ |
| $Al_{0-100^\circ} \dots 2,28 \cdot 10^{-5}$ | $Ag_{0-100^\circ} \dots 1,98 \cdot 10^{-5}$ |
| $Fe_{0-100^\circ} \dots 1,1 \cdot 10^{-5}$ | $W_{0-100^\circ} \dots 0,45 \cdot 10^{-5}$ |
| | $Pt_{16-250^\circ} \dots 0,92 \cdot 10^{-5}$ |

У анизотропных тел порядок величины тот же, но зависит от направления главных осей, так

$$Zn_{20^\circ}C \parallel a_1 = 5,74 \cdot 10^{-5},$$

$$Zn_{20^\circ}C \perp a_1 = 1,26 \cdot 10^{-5}.$$

Таблица 27
Объемное расширение 1000 α при комнатной температуре (20°) [46]

| | | | |
|---------------------------|----------|--------------------------|-------|
| Алкоголь | 1,10 | Репейное масло | 0,90 |
| Бензол | 1,25 | Ртуть | 0,181 |
| Вода | 0,18 | Серная кислота | 0,55 |
| Глицерин | 0,50 | Скипидар | 1,00 |
| Керосин | 1,0—0,92 | Эфир | 1,60 |
| Оливковое масло | 0,72 | | |

Таблица 28
Линейная усадка некоторых металлов [46]
(относительное уменьшение линейных размеров отлого предмета при его затвердевании и охлаждении)

| | | | |
|------------------------------|---------|--------------------------------------|---------|
| Бронза | 1 : 63 | Пушечный металл | 1 : 134 |
| Висмут | 1 : 265 | Полосовое железо прокатное | 1 : 55 |
| Колокольный металл | 1 : 65 | Свинец | 1 : 92 |
| Латунь | 1 : 65 | Стальное литье | 1 : 50 |
| Литая сталь | 1 : 64 | Цинк литой | 1 : 62 |
| Олово | 1 : 128 | Чугун | 1 : 96 |
| Ковкий чугун | 1 : 72 | 100 вес. ч. меди | |
| Пудлинговая сталь | 1 : 72 | 12,5 вес. ч. олова | 1 : 14 |

Примечание. В сталепрокатных мастерских принимают усадку равной в среднем 12 мм на 1 пог. м.

Всестороннее давление на твердое тело уменьшает его линейные размеры и объем. В случае аморфных и кристаллических тел кубической системы β_l одинаковы во всех направлениях $\beta = 3\beta_l$; у аморфных тел β порядка от 2 до $3 \cdot 10^{-6}$, у кристаллических — от 0,5 до $3 \cdot 10^{-6}$ (давление в $кг/см^2$); в случаях кристаллов других систем линейное сжатие различно в различных направлениях, что дает различные соотношения между β_l и β .

Сжимаемость жидкостей мала и близка к сжимаемости твердых тел. По Бриджмену, исследованные им жидкости грубо распадаются на три класса: в первый входит глицерин, во второй — вода, C_6H_5Cl и C_6H_5Br , в третий — все остальные. Под давлением 12 000 $кг/см^2$ при комнатной температуре глицерин теряет 13,4% своего первоначального объема, вещества второго класса — около 20%, третьего — около 30% (табл. 29).

Таблица 29
Относительный объем жидкостей по Бриджмену [5]

| Давление в $кг/см^2$ | Вода | | | Ртуть | | Глицерин |
|----------------------|--------|--------|--------|---------|---------|----------|
| | 0° | 5° | 95° | 0° | 2° | 30° |
| 0 | 1,0000 | 1,0119 | 1,0395 | 1,00000 | 1,00352 | 1,000 |
| 1 000 | 0,9567 | 0,9741 | 0,9984 | 0,99626 | 0,99972 | ... |
| 2 000 | 0,9248 | 0,9439 | 0,9661 | 0,99261 | 0,99593 | 0,958 |
| 3 000 | 0,8996 | 0,9201 | 0,9409 | 0,98905 | 0,99232 | ... |
| 4 000 | 0,8795 | 0,8997 | 0,9194 | 0,98561 | 0,98877 | 0,932 |
| 5 000 | 0,8626 | 0,8824 | 0,9009 | 0,98231 | 0,98540 | ... |
| 6 000 | ... | 0,8663 | 0,8849 | 0,97914 | 0,98216 | 0,911 |
| 7 000 | ... | 0,8530 | 0,8705 | 0,97607 | 0,97904 | ... |
| 8 000 | ... | 0,8407 | 0,8577 | ... | 0,97608 | 0,893 |
| 9 000 | ... | 0,8296 | 0,8461 | ... | 0,97327 | ... |
| 10 000 | ... | 0,8192 | 0,8352 | ... | 0,97059 | 0,879 |
| 11 000 | ... | ... | 0,8256 | ... | 0,96806 | ... |
| 12 000 | ... | ... | ... | ... | 0,96567 | 0,866 |

ТЕРМОДИНАМИКА

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Первое начало. Основные законы термодинамики принято называть началами. В классической термодинамике рассматриваются только два начала. Первое начало — частное выражение принципа превращения и сохранения энергии, развившееся как результат установления эквивалентности теплоты и работы. В своих капитальных работах об атомно-молекулярном учении (1745 — 1748 гг.), вылившихся по существу в механическую теорию теплоты, М. В. Ломоносов даёт закон, являющийся начальным этапом становления первого начала. Теоретические и экспериментальные работы Р. Майера (1842), Джоуля (1842 — 1850), Гельмгольца (1847), являясь последующими этапами развития первого начала, приводят к широкому признанию его в 1850 — 1860 гг.

Ф. Энгельс подчеркивает значение первого начала как учения именно о превращении энергии, которая рассматривается им как реальная сущность, качественно и ко-

личественно определяющая движение при переходе его от одной формы к другой.

Новым и ценным является, следовательно, превращение форм движения, так как утверждение количественного постоянства движения высказано уже Декартом.

Часто встречающаяся формулировка первого начала «невозможно осуществить перпетуум мобиле (дословно «вечно движущееся»)» есть утверждение невозможности осуществления машины, увеличивающей количество энергии в изолированной системе. Формулировка, не вскрывающая глубокого значения первого начала, возникла исторически в связи с попытками создания «вечного двигателя», т. е. двигателя, который производил бы работу из ничего.

Аналитическое выражение первого начала, служащее для решения конкретных технических задач, дается так называемым основным уравнением теплоты.

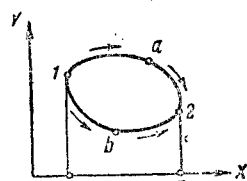
Согласно закону, в любом процессе сообщенная системе теплота Q равна приращению внутренней энергии системы ΔU ,

сложенному с работой, которую произвела система W :

$$Q = \Delta U + W,$$

где величины Q , ΔU , W выражены в одних и тех же единицах.

Работу принимают положительной, если она совершается системой, т. е. система отдаёт работу; наоборот, если работа совершается над системой, т. е. воспринимается системой, — работа отрицательна.



Фиг. 7

Примеры. Работа расширения системы с увеличением её объёма на dV и преодолением внешнего давления p

$$dW = pdV;$$

работа переноса электрического заряда de между двумя точками с разностью потенциалов E

$$dW = Ede;$$

работа сокращения поверхности жидкости на величину dS при поверхностном натяжении σ

$$dW = -\sigma dS.$$

Общий вид выражения работы $W = \int_1^2 ydx$

зависит от вида функции $y = F(x)$, т. е. при переходе системы от состояния 1 к состоянию 2 работа определяется не только начальным и конечным состояниями, но и формой пути перехода системы.

Работа процесса $1-a-2$ (фиг. 7) есть площадь $m1a2nm$, работа процесса $1-b-2$ — площадь $m1b2nm$; вторая значительно меньше, хотя у обоих процессов исходное и конечное состояния одинаковы.

В технической термодинамике уравнению первого начала придают следующий вид:

$$dQ = dU + AG \left(d \frac{w^2}{2g} + dh \right) + AdL^*,$$

где Q [ккал] — теплота, сообщаемая телу или отнимаемая от него, обычно называемая теплотой процесса;

U [ккал] — внутренняя энергия тела;

L [кгм] — работа, совершаемая телом или воспринимаемая им, так называемая работа процесса;

G [кг] — вес тела;

$d \frac{w^2}{2g}$ и Gh [кгм] — кинетическая и потенциальная энергии тела.

$A = \frac{1}{427} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{кгм}} \right]$ — термический эквивалент единицы работы.

* Вышеприведённая формулировка уравнения первого начала термодинамики и дальнейшие следствия этого уравнения, получившие распространение в технической термодинамике, базируются на условном определении работы процесса (L). В более общих выражениях первого начала термодинамики строго различаются процессы возникновения и распределения термодинамической работы, в связи с чем исключается необходимость введения условных определений работы и общее выражение первого начала термодинамики формулируется наиболее просто (ред.).

Большое распространение имеют процессы, в которых давление на поверхность тела имеет всюду одинаковую величину. В этом случае равномерного поля давлений и когда исключены массовые силы и поверхностные силы, вызывающие перемещение центра тяжести тела и вращение последнего относительно первого, работа

$$dL = pdV,$$

где dV — изменение объёма.

Практически этим охватываются процессы расширения и сжатия, протекающие внутри замкнутой оболочки, допускающей изменение объёма, распространяясь на газы и пары, в известных пределах — на капельные жидкости, а на твёрдые тела лишь при всестороннем равномерном сжатии или растяжении их.

Случай неравномерного поля давлений практически охватывает течение газов и жидкостей в закрытых неподвижных или подвижных каналах (например турбины). Здесь работа

$$L = L_C + L_E,$$

где L_C — работа, совершаемая подвижными стенками канала; L_E — работа вытеснения жидкости, необходимая для создания течения её по каналу; L_C определяется условиями перемещения стенок подвижного канала;

$$dL_E = d(pV), \quad L_E = (p_2V_2 - p_1V_1),$$

где V — объёмный расход жидкости за единицу времени.

Уравнения первого начала принимают вид:

а) равномерное поле давлений:

$$\left. \begin{aligned} dQ &= dU + ApdV; \\ Q &= (U_2 - U_1) + A \int_{V_1}^{V_2} pdV \end{aligned} \right\} \text{ккал.}$$

Относя уравнения к 1 кг ($v = \frac{V}{G}$ м³/кг), имеем

$$\left. \begin{aligned} dq &= du + Apdv; \\ q &= (u_2 - u_1) + A \int_{v_1}^{v_2} pdv \end{aligned} \right\} \text{ккал/кг;}$$

б) неравномерное поле давлений — течение сплошной среды по каналу:

$$\left. \begin{aligned} dQ &= dU + Ad(pV) + \\ &+ AG \left(d \frac{w^2}{2g} + dh \right) + AdL_C; \\ Q &= (U_2 - U_1) + A(p_2V_2 - p_1V_1) + \\ &+ AG \left[\frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + (h_2 - h_1) \right] + AL_C \end{aligned} \right\} \text{ккал.}$$

Уравнения отнесены к стационарному потоку жидкостей, когда через любое сечение канала в равные отрезки времени проходят одинаковые массы; G и V — весовой и объёмный расходы за единицу времени.

Относя уравнения к 1 кг

$$\left(v = \frac{V}{G} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \quad l_C = \frac{L_C}{G} \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \right),$$

получим

$$\left. \begin{aligned} dq &= du + A d(pv) + \\ &+ A \left(\frac{dw^2}{2g} + dh \right) + Adl_C; \\ q &= (u_2 - u_1) + A(p_2 v_2 - p_1 v_1) + \\ &+ A \left[\frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + (h_2 - h_1) \right] + Al_C \end{aligned} \right\} \text{ ккал/кг.}$$

В уравнениях первого начала dU — полный дифференциал функции состояния U (внутренняя энергия); dQ и dL — неполные дифференциалы; Q и L — функции процессов.

Через функцию состояния — энтальпию (см. термодинамические функции) $i = u + p v$ ккал/кг, уравнения первого начала выражаются:

а) равномерное поле давлений:

$$\left. \begin{aligned} dq &= di - A v dp; \\ q &= (i_2 - i_1) - A \int_{p_1}^{p_2} v dp \end{aligned} \right\} \text{ ккал/кг}$$

б) неравномерное поле давлений — течение сплошной среды по каналу:

$$\left. \begin{aligned} dq &= di + A \left(\frac{dw^2}{2g} + dh \right) + Adl_C; \\ q &= (i_2 - i_1) + A \left[\frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + \right. \\ &\left. + (h_2 - h_1) \right] + Al_C \end{aligned} \right\} \text{ ккал/кг.}$$

Второе начало. Промышленный переворот, вызванный развитием паровой машины, требовал в начале XIX столетия научного определения возможной экономичности теплового двигателя. Второе начало в первоначальной формулировке, данной С. Карно (1824), явилось научным ответом на эту проблему. Последующие работы над вторым началом (Р. Клаузиус — 1850, В. Томсон — 1852, Л. Больцман — 1900, М. Смолуховский — 1915) дали новые формулировки и показали несравненно большее значение этого закона; постепенно осуществилось перерастание второго начала из прикладного закона теплотехники в один из основных законов естествознания с глубоким философским содержанием. Аналитическая обработка второго начала, данная Клаузиусом, путём формальной экстраполяции её привела к ложному идеалистическому толкованию закона, к учению о так называемой «тепловой смерти» вселенной. Ложность этого толкования вскрыта Ф. Энгельсом, доказавшим фидеистичность сделанных выводов и противопоставившего им учение диалектического материализма о развитии природы.

Широкие обобщения второго начала, строящиеся на формальной экстраполяции его, отрицаемые категорически материалистической философией, ограничиваются уже статистической физикой (Больцман, Смолуховский). Классическая аксиоматика второго начала не раз критически пересматривалась (Каратеодори, Т. Эренфест — Афанасьева, Н. Н. Шиллер).

Вместе с тем имеются утверждения о том, что понимание термодинамики как науки, построенной на двух равно-фундаментальных принципах, ошибочно.

Существуют мнения [3] о возможности разграничения второго начала на два принципа: принцип существования энтропии (функции, введённой Клаузиусом) и принцип возрастания её, причём принцип существования энтропии признаётся следствием первого начала и имеет столь же широкое распространение; наоборот, принцип возрастания энтропии рассматривается как статистический, и применение его ограничивается обоснованиями, принятыми при становлении принципа. Классические обоснования второго начала, как обобщающего оба приведённые принципа, признаются в этом случае идущими дальше, чем это допустимо в строгом соответствии с исходными предпосылками.

Карно создал представление об идеальной машине, выполняющей некоторый круговой процесс (см. ниже, стр. 539), который принято называть циклом Карно. В отношении идеальной машины доказывается, что: 1) коэффициент полезного действия цикла Карно не зависит от природы рабочего тела; 2) при данных температурах двух тепловых источников не существует цикла тепловой машины более выгодного, чем цикл Карно, с теми же температурами теплоотдатчика и теплоприёмника.

Помимо этого второе начало получило ряд других формулировок: постулат Клаузиуса — теплота не может переходить сама собой от более холодного тела к более тёплому; принцип Планка — невозможно построить периодически действующую машину, всё действие которой сводилось бы к поднятию некоторого груза и соответствующему охлаждению теплового резервуара; принцип Каратеодори — сколь угодно близко произвольно выбранному данному состоянию системы имеются такие её состояния, из которых система не может быть переведена в данное состояние адиабатным процессом; невозможность перпетуум мобиле второго рода, что понимается как невозможность машины, способной превращать в работу всю теплоту, полученную ею от теплового источника и др.

Аналитический принцип Карно выражается к. п. д. его цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

где T_1 — абсолютная температура теплоотдатчика (верхнего теплового источника);

T_2 — абсолютная температура теплоприёмника (холодильника).

При аналитической обработке второго начала Р. Клаузиусом (1851) введена функция состояния системы — энтропия S .

Дифференциал энтропии связан с приведённой теплотой, т. е. отношением исчезающего малого количества теплоты, сообщаемого в процессе системе, к абсолютной температуре теплоисточника, соотношением

$$dS \geq \frac{dQ}{T} \text{ ккал/град};$$

знак равенства отвечает обратимому процессу, знак $>$ — необратимому. Из выражения $dS = \frac{dQ}{T}$, где dS — полный дифференциал, а dQ — неполный, следует, что $\frac{1}{T} = \omega(T)$ (функция Карно) является интегрирующим множителем для dQ .

Для конечного процесса, соответствующего переходу системы из состояния 1 в состояние 2, приращение энтропии $S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{dQ}{T}$ ккал/град, что указывает на мень-

шее значение $\int_1^2 \frac{dQ}{T}$ в случае необратимого процесса сравнительно с обратимым, так как левая часть выражения как функция состояния сохраняет своё значение.

Для замкнутых круговых процессов (циклов) интеграл Клаузиуса $\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$, знак равенства — для обратимых циклов, знак $<$ — для необратимых.

ОБЩИЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ p, v, u, i, s И СВЯЗЬ ЭТИХ ПАРАМЕТРОВ С c_p И c_v

1. Независимые переменные T и v .

$$\begin{aligned} dq &= c_v dT + AT \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv \text{ ккал/кг}; \\ ds &= c_v \frac{dT}{T} + A \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}; \\ du &= c_v dT + \left[AT \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - A_p \right] dv \text{ ккал/кг}. \end{aligned}$$

2. Независимые переменные T и p :

$$\begin{aligned} dq &= c_p dT - AT \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp \text{ ккал/кг}; \\ ds &= c_p \frac{dT}{T} - A \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}; \\ di &= c_p dT + \left[Av - AT \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp \text{ ккал/кг}. \end{aligned}$$

3. Независимые переменные p и v :

$$\begin{aligned} dq &= c_p \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_p dv + c_v \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v dp \text{ ккал/кг}; \\ ds &= \frac{c_p}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_p dv + \frac{c_v}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v dp \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}; \\ du &= \left[c_p \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_p - A_p \right] dv + \left[c_v \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v + p \right] dp \text{ ккал/кг}; \\ di &= c_p \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_p dv + \left[c_v \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v + Av \right] dp \text{ ккал/кг}. \end{aligned}$$

4. Теплоёмкости:

$$\begin{aligned} c_p - c_v &= AT \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}; \\ \left(\frac{\partial c_p}{\partial p} \right)_T &= -AT \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p; \\ \left(\frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T &= AT \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_v. \end{aligned}$$

ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ, УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА И КЛАУЗИУСА—КЛАПЕЙРОНА

Функции состояния системы, позволяющие при определённом выборе независимых переменных через свои производные (разных порядков) наиболее просто и в явном виде выражать термодинамические свойства системы, называются характеристическими.

Уравнение первого начала $dq = du + A_p dv$ и второго $dq = Tds$ исключением dq дают зависимость $Tds = du + A_p dv$, содержащую пять переменных величин: p, v, T, u, s . Принимая две из них за независимые переменные, необходимо иметь для определения остальных трёх величин три уравнения, тогда как в распоряжении имеются лишь два: уравнение $Tds = du + A_p dv$ и уравнение состояния $f(p, v, T) = 0$. Недостающее условие и даётся характеристической функцией; если последняя известна, то через её частные производные выражаются термодинамические свойства системы.

Внутренняя энергия — функция состояния системы, выражающая величину запаса энергии, который может быть выделен системой в виде теплоты и работы; производимой системой, — является при независимых переменных v и s характеристической:

$du = Tds - A_p dv$, откуда вытекает, что:

$$\begin{aligned} T &= \left(\frac{\partial u}{\partial s} \right)_v; \quad dT = \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} ds + \frac{\partial^2 u}{\partial s \partial v} dv; \\ p &= -\frac{1}{A} \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_s; \quad dp = -\frac{1}{A} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial v \partial s} ds + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial v^2} \right)_s dv \right]. \end{aligned}$$

Энтальпия — функция состояния системы $i = u + A_p v$ — при независимых переменных p и s является характеристической:

$$di = Tds + A_v dp;$$

отсюда следует, что

$$\begin{aligned} T &= \left(\frac{\partial i}{\partial s} \right)_p; \quad dT = \frac{\partial^2 i}{\partial s \partial p} dp + \left(\frac{\partial^2 i}{\partial s^2} \right)_p ds; \\ v &= \frac{1}{A} \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_s; \quad dv = \frac{1}{A} \left[\left(\frac{\partial^2 i}{\partial p^2} \right)_s dp + \frac{\partial^2 i}{\partial p \partial s} ds \right]; \\ i &= u + p \left(\frac{\partial u}{\partial p} \right)_s. \end{aligned}$$

Свободная энергия — функция состояния системы $F = u - Ts$ — при независимых переменных T и v является характеристической:

$$dF = -A_p dv - s dT,$$

откуда

$$s = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_v; ds = -\left(\frac{\partial^2 F}{\partial T^2}\right)_v dT - \frac{\partial^2 F}{\partial T \partial v} dv;$$

$$p = -\frac{1}{A} \left(\frac{\partial F}{\partial v}\right)_T;$$

$$dp = -\frac{1}{A} \left[\left(\frac{\partial^2 F}{\partial v^2}\right)_T dv + \frac{\partial^2 F}{\partial v \partial T} dT \right];$$

$$F = u + T \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_v.$$

Термодинамический потенциал при постоянном давлении (изобарный потенциал) — $\Phi = u - Ts + Apv = F + Apv = i - Ts$ — при независимых переменных T и p служит характеристической функцией:

$$d\Phi = Avdp - sdT,$$

откуда

$$s = -\left(\frac{\partial \Phi}{\partial T}\right)_p; ds = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial T^2} dT - \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial T \partial p}\right)_p dp;$$

$$v = \frac{1}{A} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial p}\right)_T; dv = \frac{1}{A} \left[\left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial p^2}\right)_T dp + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial p \partial T} dT \right];$$

$$\Phi = i + T \left(\frac{\partial \Phi}{\partial T}\right)_p.$$

Уравнения Максвелла

$$\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_s = -A \left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_v; \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s = A \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_p;$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T = A \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v; -\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T = A \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p.$$

Уравнение Клаузиуса—Клапейрона

$$\frac{\partial p}{\partial T} = \frac{\lambda_\phi}{AT(v'' - v')},$$

где λ_ϕ — скрытая теплота перехода одной фазы в другую (плавления, парообразования, сублимации); v' и v'' — удельные объёмы фаз (см. «Водяной пар», стр. 546).

ГАЗЫ

ИДЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

Основные законы

При переходе данной массы газа из одного состояния в другое при условии неизменности температуры объём, занимаемый газом, и давление его связаны соотношением

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2},$$

или

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 —$$

закон, сформулированный Бойлем в 1662 г. и независимо от него Мариоттом в 1676 г.

Соотношение между объёмом, занимаемым газом, и температурой при переходе данной массы газа из одного состояния в другое при условии сохранения неизменным давления его имеет вид:

$$v_1 = v_0 (1 + 0,003661 t_1);$$

$$v_2 = v_0 (1 + 0,003661 t_2),$$

откуда

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1 + \frac{t_2}{273,15}}{1 + \frac{t_1}{273,15}}$$

и

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} —$$

закон сформулирован Гей-Люссаком (1802).

Коэффициент расширения $\alpha_0 = \frac{1}{273,15} = 0,003661$

одинаков для всех газов; v_0, v_1, v_2 — объёмы при 0°C ; $t_1^\circ \text{C}, t_2^\circ \text{C}$; T_1 и T_2 — абсолютные температуры.

Газы, строго подчиняющиеся законам Бойля-Мариотта и Гей-Люссака, называют

идеальными. Реальные газы уклоняются от этих закономерностей; эти отклонения тем меньше, чем меньше давление газа и чем выше его температура.

Для любого состояния идеального газа параметры его отвечают условию

$$\frac{pv}{T} = R,$$

или

$$pv = RT,$$

являющемуся уравнением состояния идеального газа (уравнение Клапейрона), отнесённым к 1 кг газа,

где $R \left| \frac{\text{кгм}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right|$ — для данного газа константа — газовая постоянная;

$v \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right)$ — удельный объём газа.

Умножением $pv = RT$ на G кг получают уравнение состояния идеального газа, отнесённое к произвольному количеству газа

$$p \cdot V = GRT,$$

где $V = v \cdot G$ (м^3).

Значения R приведены в табл. 30.

Если μ — молекулярный вес газа, то приняв $G = \mu$, получают уравнение состояния для 1 моля газа

$$pV_\mu = (\mu R) T = 848 T,$$

где $V_\mu = \mu \cdot \text{м}^3 / \text{моль}$ — объём моля;

$\mu R = 848 \frac{\text{кгм}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$ — газовая постоянная;

отнесённая к молю газа, так называемая универсальная газовая постоянная, одинаковая для всех газов (следствие закона Авогадро).

Следствием закона Авогадро, согласно которому одинаковые объёмы различных

газов содержат при одинаковых p и T одинаковые числа молекул, является

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2};$$

$$v_1\mu_1 = v_2\mu_2 = V_\mu,$$

т. е. что в равных условиях давлений и температур объёмы молей различных газов одинаковы.

Число молекул в граммолекуле, число Авогадро, $N = 6,064 \cdot 10^{23}$; объём моля идеального газа при 0°C и 760 мм рт. ст. $V_{\mu, 0} = 22,416 \text{ м}^3/\text{моль}$; объём моля при 15°C и давлении 1 кг/см^2 $V_{\mu, 15} \approx 24,4 \text{ м}^3/\text{моль}$.

Удельный вес газа в произвольном состоянии $\gamma = \frac{\mu}{V_\mu}$, где V_μ — объём моля в тех условиях, для которых ищут γ .

Удельный вес при 0°C и 760 мм рт. ст.

$$\gamma_0 = \frac{\mu}{22,416} \approx \frac{\mu}{22,4}$$

(в обычных расчётах принимают $V_{\mu, 0} = 22,4$; в обоих случаях полагают, что газ подчиняется закону Авогадро; отклонения см. в табл. 30).

Газовые смеси

Давление смеси химически не действующих друг на друга газов равно сумме парциальных давлений (закон Дальтона)

$$p = \sum_{i=1}^{i=n} p_i,$$

где p_i — парциальное давление i -го компонента, т. е. то давление, которое оказывал бы этот компонент, если бы остальные компо-

ненты были удалены из объёма, занимаемого смесью, а его температура оставалась равной температуре смеси.

Смеси химически не действующих друг на друга газов подчиняются основным законам в той же мере, как и их составляющие. Уравнение состояния $pV = GR_mT$; здесь p , V , G , R_m , T — параметры смеси; для смеси из n составляющих

$$V = \sum_{i=1}^{i=n} V_i,$$

где V_i — приведённый объём i -го компонента, т. е. объём, который занимал бы i -й компонент, если бы при температуре смеси он имел давление смеси p , а не своё парциальное

$$G = \sum_{i=1}^{i=n} G_i,$$

где G_i [кг] — вес i -го компонента.

Газовая постоянная смеси газов

$$R_m = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{G_i}{G} \cdot R_i = \sum_{i=1}^{i=n} g_i R_i,$$

где R_i — газовая постоянная i -го компонента,

$$R_i = \frac{848}{\mu_i},$$

g_i — весовая доля i -го компонента;

$p_i V = G_i R_i T$ — уравнение состояния i -го компонента смеси;

$p V_i = G_i R_i T$ — уравнение состояния i -го компонента, соответствующее приведённому состоянию его;

Свойства газов [18]

Таблица 30

| Газ | Формула | Молекулярный вес μ | Газовая постоянная R в $\text{кг/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ | Нормальный удельный вес γ_0 в кг/м^3 | | Точка кипения в $^\circ\text{C}$ | Точка плавления в $^\circ\text{C}$ | Критические параметры | | | Теплоёмкость c_p при 0°C в $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ | $\frac{c_p}{c_v}$ при 0°C |
|------------------------------|--------------------------|------------------------|--|--|---------|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------|------------------------------|--|--|
| | | | | вычисл. | измер. | | | t_k в $^\circ\text{C}$ | p_k Ат | γ_k в г/см^3 | | |
| Азот | N_2 | 28,016 | 30,25 | 1,2498 | 1,2505 | -195,81 | -210,02 | -147,1 | 33,5 | 0,311 | 0,249 | 1,40 |
| Аммиак | NH_3 | 17,031 | 49,8 | 0,7593 | 0,7714 | -33,4 | -77,7 | -132,4 | 111,5 | 0,235 | 0,492 | 1,32 |
| Аргон | Ar | 39,944 | 21,2 | 1,7819 | 1,7839 | -185,9 | -189,3 | -122,4 | 48,0 | 0,531 | 0,125 | 1,67 |
| Ацетилен | C_2H_2 | 26,04 | 32,5 | 1,1617 | 1,1709 | -83,6 | -81 | 35,7 | 61,6 | 0,231 | 0,392 | 1,23 |
| Водород | H_2 | 2,0156 | 420,5 | 0,08992 | 0,08987 | -252,78 | -259,20 | -239,9 | 12,8 | 0,0310 | 3,400 | 1,41 |
| Воздух | — | 28,96 | 29,27 | 1,2922 | 1,2923 | -194,0 | -140,7 | 37,2 | 37,2 | 0,31 | 0,239 | 1,40 |
| Гелий | He | 4,002 | 211,9 | 0,1786 | 0,1785 | -268,9 | -267,9 | 2,26 | 0,069 | 1,250 | 1,66 | |
| Дифтордихлорметан | CF_2Cl_2 | 120,92 | 7,01 | 5,394 | 5,083 | -30,0 | -155 | 111,5 | 39,6 | 0,555 | — | 1,14 |
| Кислород | O_2 | 32,0000 | 26,5 | 1,4276 | 1,42895 | -182,97 | -218,83 | -118,8 | 49,7 | 0,430 | 0,218 | 1,40 |
| Метан | CH_4 | 16,04 | 52,8 | 0,7152 | 0,7168 | -161,7 | -182,5 | -82,5 | 45,7 | 0,162 | 0,520 | 1,30 |
| Оксид углерода | CO | 28,01 | 30,25 | 1,2496 | 1,2500 | -191,5 | -205 | -140,2 | 34,5 | 0,301 | 0,251 | 1,40 |
| Пропан | C_3H_8 | 44,09 | 19,25 | 1,967 | 2,019 | -42,6 | -189,9 | 96,8 | 42,0 | 0,226 | — | 1,14 |
| Пропилен | C_3H_6 | 42,08 | 20,15 | 1,877 | 1,915 | -47,0 | -135,2 | 92,0 | 45,3 | | | |
| Сернистый ангидрид | SO_2 | 64,06 | 13,23 | 2,8581 | 2,9263 | -10,0 | -75,3 | 757,3 | 77,8 | 0,524 | 0,151 | 1,40 |
| Углекислота | CO_2 | 44,01 | 19,25 | 1,9633 | 1,9768 | -78,48 | -56 | 31,0 | 73 | 0,46 | 0,197 | 1,31 |
| Фтор | F_2 | 38,000 | 22,3 | 1,695 | 1,695 | -188 | -220 | -101 | | | | |
| Хлор | Cl_2 | 70,914 | 11,95 | 3,16 | 3,22 | -35,0 | -103 | -144 | 76 | 0,573 | 0,120 | 1,34 |
| Этан | C_2H_6 | 30,07 | 28,2 | 1,341 | 1,356 | -88,6 | -183,9 | 35 | 49 | 0,21 | 0,393 | 1,22 |
| Этилен | C_2H_4 | 28,05 | 30,23 | 1,251 | 1,2605 | -103,5 | -169,4 | 9,5 | 50,7 | 0,216 | 0,350 | 1,24 |

Примечание. Вычисленные значения γ_0 получены делением μ на 22,416; расхождения между вычисленным и измеренным значениями объясняются отклонениями от идеальных законов.

Весовой состав смеси определяется весовыми долями; весовая доля i -го компонента

$$g_i = \frac{G_i}{G}, \quad \sum_{i=1}^{i=n} g_i = 1.$$

Объёмный состав смеси определяется объёмными долями; объёмная доля i -го компонента

$$r_i = \frac{V_i}{V}, \quad \sum_{i=1}^{i=n} r_i = 1.$$

Здесь V_i — приведённый объём i -го компонента.

Формулы пересчёта из весового состава в объёмный и обратно:

$$r_i = \frac{\frac{g_i}{\gamma_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{g_i}{\gamma_i}}, \quad g_i = \frac{r_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^{i=n} r_i \gamma_i}.$$

Удельный вес смеси при произвольных p и T

$$\gamma_m = \frac{G}{V} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{g_i}{\gamma_i}} = \sum_{i=1}^{i=n} r_i \gamma_i.$$

Удельный вес смеси при 0°C и 760 мм рт. ст.

$$\gamma_{m,0} = \frac{\mu_m}{22,4},$$

где μ_m — средний, кажущийся молекулярный вес смеси (кажущийся потому, что это величина чисто расчётная, упрощающая подсчёты, не связанная с химическим представлением о молекулярном весе):

$$\mu_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{g_i}{\mu_i}} = \sum_{i=1}^{i=n} r_i \mu_i.$$

Парциальные давления

$$p_i = g_i \frac{R_i}{R_m} \cdot p = r_i \cdot p.$$

Теплоёмкости смесей могут находиться по теплоёмкостям компонентов смеси либо по весовому составу её, либо по объёмному.

При заданных весовых теплоёмкостях $c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n$ $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ и весовых долях компонентов $g_1, g_2, \dots, g_i, \dots, g_n$ весовая теплоёмкость смеси

$$c_m = \sum_{i=1}^{i=n} g_i c_i \left[\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right].$$

При заданных объёмных теплоёмкостях $\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_i, \dots, \bar{c}_n$ $\frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3 \cdot \text{град}}$ и объёмном

составе смеси $r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_n$ объёмная теплоёмкость смеси

$$\bar{c}_m = \sum_{i=1}^{i=n} r_i \bar{c}_i \left[\frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3 \cdot \text{град}} \right].$$

При заданных молярных теплоёмкостях $\mu_1 c_1, \mu_2 c_2, \dots, \mu_i c_i, \dots, \mu_n c_n$ $\frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$ и объёмном составе $r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_n$ молярная теплоёмкость смеси

$$\mu_m c_m = \sum_{i=1}^{i=n} r_i (\mu_i c_i) \left[\frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}} \right].$$

При переменных теплоёмкостях [$c=f(t)$] расчёты получаются громоздкими, более просто исходить из молярных теплоёмкостей и объёмного состава с последующим в случае необходимости пересчётом на весовые и объёмные теплоёмкости:

$$c_m = \frac{(\mu_m c_m)}{\mu_m} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right];$$

$$\bar{c}_m = \frac{(\mu_m c_m)}{22,4} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3 \cdot \text{град}} \right].$$

Давление и температура газов после смешения

Смешение при $V=\text{const.}$ Химически не действующие друг на друга газы до смешения имеют объёмы V_1, V_2, \dots, V_n , веса G_1, G_2, \dots, G_n , при давлениях p_1, p_2, \dots, p_n и температурах t_1, t_2, \dots, t_n ; объём смеси

$$V = \sum_{i=1}^{i=n} V_i.$$

Температура смеси

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} p_i V_i (\mu_i c_{v,i})_0^{T_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{p_i V_i}{T_i} (\mu_i c_{v,i})_0^T},$$

или

$$t = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{p_i V_i}{T_i} (\mu_i c_{v,i})_0^{t_i} \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{p_i V_i}{T_i} (\mu_i c_{v,i})_0^t}.$$

Давление после смешения

$$p = \frac{T}{V} \sum_{i=1}^{i=n} G_i R_i = \frac{T}{V} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{p_i V_i}{T_i}.$$

Предпосылкой получения приведённых уравнений служит равенство внутренней энергии системы до и после смешения, вытекающее по первому началу из условия отсутствия теплообмена с окружающей средой и неизменности объёма до и после сме-

нения, т. е. из условия отсутствия внешней работы.

Смешение потоков газов. Потоки газов имеют расходы в единицу времени по весу G_1, G_2, \dots, G_n , по объёму V_1, V_2, \dots, V_n , их давления и температуры p_1, p_2, \dots, p_n ; t_1, t_2, \dots, t_n ; давление p после смешения не должно превышать давления того потока, у которого оно было наименьшим. Отсутствие при смешении теплообмена с окружающей средой и отдачи внешней работы приводит поставленную задачу к условию (по уравнению первого начала для движущихся сред), что энтальпия системы остаётся неизменной.

Температура после смешения

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} p_i V_i (\mu_i c_{p,i})_0^T t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{p_i V_i}{T_i} (\mu_i c_{p,i})_0^T},$$

или

$$t = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{p_i V_i}{T_i} (\mu_i c_{p,i})_0^t \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{p_i V_i}{T_i} (\mu_i c_{p,i})_0^t}.$$

Объёмный расход смеси в единицу времени при температуре T и давлении p

$$V = \frac{T}{p} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{p_i V_i}{T_i}.$$

Если мольные теплоёмкости и давление газов во всех потоках одинаковы, то

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} V_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{V_i}{T_i}} \quad \text{и} \quad V = \sum_{i=1}^{i=n} V_i.$$

Соотношения между параметрами p, v, T, u, i, s и связь этих параметров с c_p и c_v для газов, подчиняющихся уравнению $pv = RT$.

Вводя в уравнения, приведённые на стр. 528, выражения соответственных частных производных, полученные из уравнения состояния идеального газа, связывающего p, v, T , имеем:

1. Независимые переменные T и v :

$$dq = c_v dT + Ap dv \quad [\text{ккал/кг}];$$

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + AR \frac{dv}{v} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right];$$

$$du = c_v dT \quad [\text{ккал/кг}];$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = AT \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - Ap = 0,$$

что устанавливает независимость внутренней энергии от объёма, т. е. $u = f(T)$ для газа, подчиняющегося уравнению $pv = RT$.

2. Независимые переменные T и p :

$$dq = c_p dT - Av dp \quad [\text{ккал/кг}];$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - AR \frac{dp}{p} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right];$$

$$di = c_p dT \quad [\text{ккал/кг}];$$

$$\left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_T = Av - AT \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = 0,$$

что устанавливает независимость энтальпии газа от давления, т. е. $i = f_1(T)$.

3. Независимые переменные p и v :

$$dq = \frac{c_p}{R} p dv + \frac{c_v}{R} v dp \quad [\text{ккал/кг}];$$

$$ds = c_p \frac{dv}{v} + c_v \frac{dp}{p} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right].$$

4. Теплоёмкости:

Разность теплоёмкостей $c_p - c_v = AR$; умножением на μ получаем

$$\mu c_p - \mu c_v = A (\mu R) = \frac{1}{427} \cdot 848 = 1,985 \approx 2 \left[\frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}} \right];$$

что устанавливает постоянство разности мольных теплоёмкостей для различных газов и равенство этой разности универсальной газовой постоянной, выраженной в тепловых единицах.

$\left(\frac{\partial c_p}{\partial p} \right)_T = 0$ — независимость c_p от давления;

$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T = 0$ — независимость c_v от объёма.

Отношение Пуассона, показатель адиабаты $k = \frac{c_p}{c_v} = 1 + \frac{AR}{c_v}$; $k = f(t)$ при повышении температуры убывает как следствие увеличения теплоёмкости c_v . Для двухатомных газов при температурах, близких к 0°C , принимают $k = 1,4$, для газов многоатомных k меньше.

Интегрирование приведённых уравнений может вестись либо в предположении, что $c = f(t)$ (часто эта функция принимается линейной), либо в предположении постоянства теплоёмкости; последнее предположение принимают, во-первых, при малых интервалах температур, когда изменениями теплоёмкости можно практически пренебречь, во-вторых, в тех случаях, когда изменение теплоёмкости учитывается тем, что в расчёт вводят значение средней теплоёмкости в рассматриваемом интервале.

Интегрирование при постоянных теплоёмкостях.

$$1. \quad q = c_v (T_2 - T_1) + A \int_{v_1}^{v_2} p dv;$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + AR \ln \frac{v_2}{v_1};$$

$$u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1).$$

$$2. q = c_p (T_2 - T_1) - A \int_{p_1}^{p_2} v dp;$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - AR \ln \frac{p_2}{p_1};$$

$$i_2 - i_1 = c_p (T_2 - T_1).$$

$$3. q = \frac{c_p}{R} \int_{v_1}^{v_2} p dv + \frac{c_v}{R} \int_{p_1}^{p_2} v dp;$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{v_2}{v_1} + c_v \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

При переменных теплоёмкостях результат будет зависеть от вида функции $c = f(t)$. При линейных функциях $c_v = a_v + bT$ и $c_p = a_p + bT$, где $a_p - a_v = AR$, имеем:

$$1. q = a_v (T_2 - T_1) +$$

$$+ \frac{b}{2} (T_2^2 - T_1^2) + A \int_{v_1}^{v_2} p dv;$$

$$s_2 - s_1 = a_v \ln \frac{T_2}{T_1} + b (T_2 - T_1) + AR \ln \frac{v_2}{v_1};$$

$$u_2 - u_1 = a_v (T_2 - T_1) + \frac{b}{2} (T_2^2 - T_1^2).$$

$$2. q = a_p (T_2 - T_1) +$$

$$+ \frac{b}{2} (T_2^2 - T_1^2) - A \int_{p_1}^{p_2} v dp;$$

$$s_2 - s_1 = a_p \ln \frac{T_2}{T_1} + b (T_2 - T_1) - AR \ln \frac{p_2}{p_1};$$

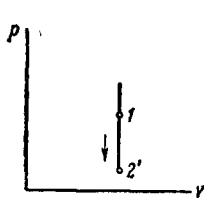
$$i_2 - i_1 = a_p (T_2 - T_1) + \frac{b}{2} (T_2^2 - T_1^2).$$

$$3. s_2 - s_1 = a_p \ln \frac{v_2}{v_1} + b (T_2 - T_1) + a_v \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

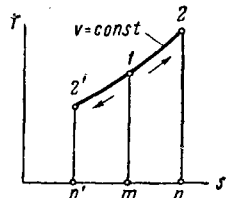
Приведённые уравнения отнесены к 1 кг газа; умножение обеих частей уравнений на μ относит их к 1 молю, умножение на G кг даёт уравнения для произвольного количества газа.

ЧАСТНЫЕ ВИДЫ ПРОЦЕССОВ

Изохорный процесс (фиг. 8 и 9) определяется условием $v = \text{const}$, $dv = 0$; соотношения параметров: $\frac{p}{T} = \frac{R}{v} = \text{const}$; для перехода из состояния 1 в 2 (2'):



Фиг. 8



Фиг. 9

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

где $T_2 > T_1$, $T_2' < T_1$.

Уравнение первого начала принимает вид:

$$dq_v = du = c_v dt;$$

$$q_v = u_2 - u_1 = \int_{t_1}^{t_2} c_v dt =$$

$$= [c_{v,m}]_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1) =$$

$$\Rightarrow [c_{v,m}]_0^{t_2} \cdot t_2 - [c_{v,m}]_0^{t_1} \cdot t_1.$$

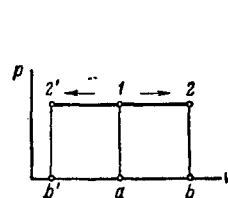
$$dq_v = du = c_v \cdot dT;$$

$$q_v = u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT =$$

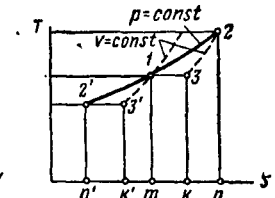
$$= [c_{v,m}]_{T_1}^{T_2} \cdot (T_2 - T_1).$$

Если c_v дано как $f(t)$ (линейная функция).

Если c_v дано как $f_1(T)$.



Фиг. 10



Фиг. 11

Работа процесса $l = \int_{v_1}^{v_2} p dv$ равна нулю ($dv = 0$); теплота, сообщаемая газу, идёт на увеличение его внутренней энергии, отвод теплоты осуществим за счёт уменьшения внутренней энергии тела.

В диаграмме $p-v$ процесс протекает по прямой, параллельной оси ординат: 1-2 — подвод теплоты ($p_2 > p_1$, $T_2 > T_1$); 1-2' — отвод.

В диаграмме $T-s$:

$$ds_v = c_v \frac{dT}{T};$$

$$(s_2 - s_1)_v = \int_{T_1}^{T_2} c_v \frac{dT}{T} = [c_{v,m}]_{T_1}^{T_2} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1};$$

изохоры — логарифмики; 1-2 — подвод теплоты ($ds_v > 0$); 1-2' — отвод теплоты от тела ($ds_v < 0$). Площадь под изохорой в диаграмме $T-s$ выражает (с учётом масштабов) теплоту процесса q_v , равно как изменение внутренней энергии.

Изобарный процесс (фиг. 10, 11) определяется условием $p = \text{const}$, $dp = 0$; соотношения параметров $\frac{v}{T} = \frac{R}{p} = \text{const}$, для пе-

рехода из состояния 1 в 2 (2') $\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$; 1-2 — расширение; 1-2' — сжатие; $T_2 > T_1$, $T_2' < T_1$.

Уравнение первого начала принимает вид:

$$q_p = u_2 - u_1 + Ap(v_2 - v_1) = i_2 - i_1 =$$

$$= \int_{t_1}^{t_2} c_p dt = [c_{p,m}]_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1) =$$

$$= [c_{p,m}]_0^{t_2} \cdot t_2 - [c_{p,m}]_0^{t_1} \cdot t_1$$

Если c_p дано как $f(t)$ (линейная функция).

$$q_p = i_2 - i_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = \begin{cases} \text{Если } c_p \\ \text{дано как} \\ f_1(T). \end{cases}$$

$$= [c_p, m]_{T_1}^{T_2} \cdot (T_2 - T_1).$$

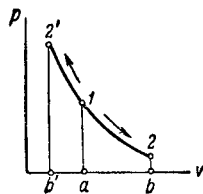
Работа процесса:

$$l_p = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1) \text{ [кдж/кг]};$$

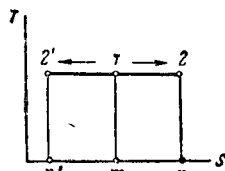
$$L_p = p(V_2 - V_1) = GR(T_2 - T_1) \text{ [кдж]}.$$

В диаграмме $p-v$ процесс протекает по прямой, параллельной оси абсцисс, площадь под кривой процесса выражает работу; $a-1-2-b-a$ (с учётом масштабов) — работа процесса расширения, положительна ($dv > 0$).

В диаграмме $T-s$ изобары — логарифмически более пологие, нежели изохоры.



Фиг. 12



Фиг. 13

Площади под кривыми процессов $1-2$ и $1-2'$ (т. е. площади $m-1-2-n-m$ и $m-1-2'-n'-m$) выражают (с учётом масштабов) количества теплоты $q_{p, 1-2}$, $q_{p, 1-2'}$ и равные им изменения энтальпии Δi_{1-2} и $\Delta i_{1-2'}$; площади под изохорами, проведёнными в пределах изменения температур в рассматриваемом процессе, т. е. площади $n-2-3-k-n$ и $m-1-3'-k'-m$, дают изменения внутренней энергии Δu_{1-2} и $\Delta u_{1-2'}$; работа процесса (в тепловых единицах Al_p) на диаграмме определяется разностью площадей, выражающих теплоту процесса q_p и изменение внутренней энергии. Знаки определяются так: теплота процесса $q_p > 0$ при увеличении энтропии в процессе ($s_2 > s_1$), Δu и Δi положительны при увеличении температуры ($T_2 > T_1$), работа положительна при $v_2 > v_1$.

Изотермический процесс (фиг. 12, 13) определяется условием $T = \text{const}$, $dT = 0$; соотношения параметров $p \cdot v = \text{const}$; при переходе из состояния 1 в 2 ($2'$):

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}, \quad \frac{p_2'}{p_1} = \frac{v_1}{v_2'}.$$

Уравнение первого начала принимает вид

$$dq_T = Adl_T$$

(для газа, подчиняющегося уравнению $p \cdot v = RT$ при $dT = 0$, $du = c_p \cdot dT = 0$ и $di = c_p \cdot dT = 0$); работа процесса

$$l_T = \int_{v_1}^{v_2} p dv = 2,303 p_1 v_1 \lg \frac{v_2}{v_1} = 2,303 p_1 v_1 \lg \frac{p_1}{p_2} \text{ [кдж/кг]},$$

где $p_1 v_1 = RT$;

$$L_T = 2,303 p_1 V_1 \lg \frac{V_2}{V_1} = 2,303 p_1 V_1 \lg \frac{p_1}{p_2} \text{ [кдж]},$$

где $p_1 V_1 = GRT$.

Теплота процесса $q_T = Al_T$, $Q_T = AL_T$. В диаграмме $p-v$ изотермы — равнобокие гиперболы ($1-2$ — расширение, $v_2 > v_1$; $1-2'$ — сжатие, $v_2' < v_1$); площади $a-1-2-b-a$ и $a'-1-2'-b'-a$ выражают $l_{T, 1-2}$ (> 0), $l_{T, 1-2'}$ (< 0).

В диаграмме $T-s$ площади $m-1-2-n-m$ и $m-1-2'-n'-m$ выражают теплоту процесса

$$q_{T, 1-2} (> 0, \text{ так как } ds > 0)$$

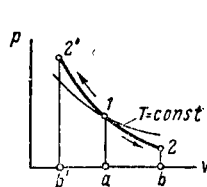
и $q_{T, 1-2'} (< 0$, так как $ds < 0$) и равные им работы, выраженные в тепловых единицах.

Для построения изотермы в диаграмме $p-v$ (фиг. 14) из начального состояния 1 проводят параллельно осям прямые $1-A$ и $1-B$; их пересекают лучами из начала координат ($o-m$, $o-m_1$, $o-m_2$, ...) под произвольными углами. Проводя через точки пересечения лучей с прямыми $1-A$ и $1-B$ линии, параллельные осям, получаем точки пересечения 2, 3, ..., принадлежащие изотерме: $p_1 v_1 = p_2 v_2 = \dots = \text{const}$.

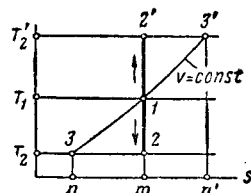
Адиабатный процесс (фиг. 15, 16) определяется условием отсутствия теплообмена с окружающей средой как в элементарном, так и в конечном процессах $dq_A = 0$ и $q_A = 0$. Уравнение первого начала принимает вид:

$$du = -Adl_A;$$

$$u_2 - u_1 = c_{v, m} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1) = -Al_A.$$



Фиг. 15



Фиг. 16

Сущность процесса заключается в получении работы за счёт уменьшения внутренней энергии газа; наоборот, при сжатии затрачиваемая работа идёт на повышение внутренней энергии.

Соотношения параметров (c_p и c_v приняты постоянными):

$$\left. \begin{aligned} p \cdot v^k &= \text{const}; p_1 v_1^k = p_2 v_2^k; \\ T \cdot v^{k-1} &= \text{const}; \\ T_1 \cdot v_1^{k-1} &= T_2 \cdot v_2^{k-1}; \\ T \cdot p^{\frac{k-1}{k}} &= \text{const}; \frac{T_1}{p_1^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{T_2}{p_2^{\frac{k-1}{k}}} \end{aligned} \right\} k = \frac{c_p}{c_v}.$$

Работа процесса:

$$\left. \begin{aligned} l_A &= \frac{1}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right] = \\ &= \frac{1}{k-1} R T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \\ &= \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = \\ &= \frac{1}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \end{aligned} \right\} \text{кДж/кг}.$$

Приведённые соотношения параметров в адиабатном процессе имеют место при условии, что теплоёмкости c_p и c_v не зависят от температуры. У реальных газов они переменны, переменны и k . Уравнение адиабаты при переменных теплоёмкостях см. ниже, 2-й столб. Обычно расчёты ведут по приведённым соотношениям, но показатель k принимают равным среднему арифметическому значению его между значениями при предельных температурах процесса. Для двухатомных газов при температурах, близких к 0°С, принимают $k = 1,4$.

В диаграмме $p-v$ адиабата ($p v^k = \text{const}$) протекает круче изотермы ($k > 1$); 1-2—расширение; 1-2'—сжатие; $a-1-2-b-a$ выражает работу расширения l_A (> 0 , так как $dv > 0$); $a-1-2'-b'-a$ —работу сжатия l'_A (< 0 , так как $dv < 0$).

В диаграмме $T-s$ адиабата—прямая, параллельная оси ординат, $ds = 0$ (так как $dq_A = 0$ и $dq_A = T \cdot ds$, где $T \neq 0$); 1-2—расширение ($T_2 < T_1$); 1-2'—сжатие ($T_{2'} > T_1$).

Проведением изохор (1-3 и 1-3') в пределах изменения температур в процессе получают площади $m-1-3-n-m$ и $m-1-3'-n'-m$, выражающие изменение внутренней энергии (Δu_{1-2} и $\Delta u_{1-2'}$) и равные им, но обратные по знаку работы в тепловых единицах (Al_A и Al'_A).

При расширении

$$\Delta u_{1-2} < 0, Al_A > 0;$$

при сжатии

$$\Delta u_{1-2'} > 0, Al'_A < 0.$$

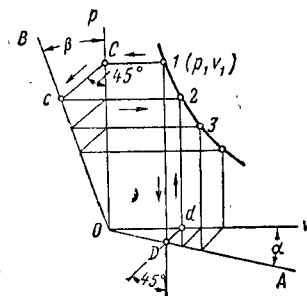
Построение адиабаты в координатах $p-v$ по одной заданной точке адиабаты (состояние 1) дано на фиг. 17.

Под произвольным углом α к оси абсцисс проводят из начала координат луч OA , под углом β к оси ординат—луч OB ; угол β определяют из уравнения:

$$(1 + \tg \alpha)^k = 1 + \tg \beta.$$

Проектируя точку 1 на ось ординат, получают точку C ; опуская из точки 1 перпендикуляр на ось абсцисс и продолжая его до пересечения с лучом OA , находят точку D . Из точек C и D проводят под углом 45° наклонные Cc и Dd к ординате и абсциссе, из c проводят горизонталь, из d —вертикаль, пересечение которых даёт точку 2 адиабаты; для получения точки 3 аналогично используется точка 2 и т. д.

Построение требует весьма тщательного выполнения, так как допущенная ошибка при дальнейшем построении увеличивается.



Фиг. 17

При линейной зависимости теплоёмкостей от температуры $c_v = a_v + bT$, $c_p = a_p + bT$ уравнение адиабаты

$$p v^{\frac{a_p}{a_v} + \frac{b}{a_v} T} = \text{const}.$$

Политропный процесс— процесс, удовлетворяющий уравнению $p v^n = \text{const}$, где под n подразумевают произвольное, но для данного процесса постоянное число. Для идеального газа с постоянными теплоёмкостями c_p и c_v политропный процесс характеризуется тем, что распределение теплоты между внутренней энергией и работой постоянно на всём протекании процесса; в этом случае, сохраняя этот признак постоянства распределения теплоты, уравнение $p v^n = \text{const}$ обобщает процессы $p = \text{const}$ ($n=0$), $T = \text{const}$ ($n=1$), $dq = 0$ и $q = 0$ ($n=k$), $v = \text{const}$ ($n = \infty$).

Если c_p и c_v рассматриваются как функции температуры, то определяющим признаком является лишь вид уравнения.

Для подсчёта теплоты процесса помимо уравнения первого начала $dq = du + Adl$, $q = u_2 - u_1 + Al$ используется уравнение политропы $dq = c \cdot dT$. Теплоёмкость политропного процесса

$$c = c_v + \frac{AR}{1-n} = c_v \frac{n-k}{n-1}$$

может принимать любые положительные и отрицательные значения в зависимости от выбора n при данном k , чем определяется зависимость теплоёмкости не только от природы тела, но и от процесса, в котором подводятся теплота; теплота процесса

$$q = \int_{T_1}^{T_2} c dT = c_m \left(T_2 - T_1 \right).$$

Соотношения параметров те же, что и для адиабаты, но с заменой k на n :

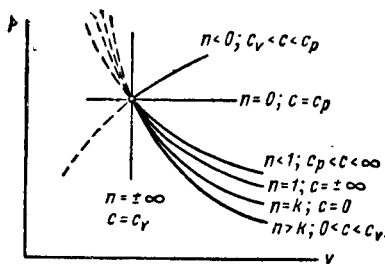
$$p \cdot v^n = \text{const};$$

$$T \cdot v^{n-1} = \text{const};$$

$$T \cdot p^{-\frac{n-1}{n}} = \text{const}.$$

Работа процесса

$$\begin{aligned} l &= \frac{1}{n-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right] = \\ &= \frac{1}{n-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = \\ &= \frac{1}{n-1} RT_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \\ &= \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) \text{ [кДж/кг]}. \end{aligned}$$



Фиг. 18

Показатель политропы n определяет её протекание; характерные случаи даны на фиг. 18.

Методы определения показателя политропы по данной кривой процесса в координатах $p-v$.

I. Предполагая, что процесс 1-2 удовлетворяет уравнению $p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$, имеем

$$n = \frac{\lg \frac{p_2}{p_1}}{\lg \frac{v_1}{v_2}};$$

значения p и v можно брать прямо из диаграммы без учёта масштабов (фиг. 19).

II. Для политропы 1-2

$$n = \frac{\int_{v_1}^{v_2} v dp}{\int_{v_1}^{v_2} p dv} = \frac{\text{плоч. } a'-1-2-b'-a'}{\text{плоч. } a-1-2-b-a'};$$

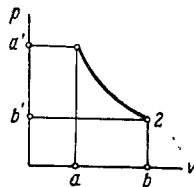
т. е. определение требует планиметрирования указанных площадей (фиг. 19).

III. Показатель n политропы для точки 1 процесса равен частному от деления v на a (фиг. 20), т. е. $n = \frac{v}{a}$, где a — подкасательная.

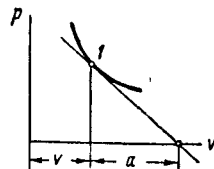
IV. Из уравнения $p v^n = \text{const}$ следует, что $\lg p + n \lg v = \text{const}$, т. е. в координатах $\lg p, \lg v$ политропа — прямая, а значение n

равно тангенсу угла наклона прямой. Таким образом для нахождения n необходим перенос процесса по точкам из $p-v$ координат в координаты $\lg p - \lg v$ и нахождение $\tan \alpha$ (фиг. 21).

При расчётах важно влияние погрешности в определении показателя n [18]. При



Фиг. 19

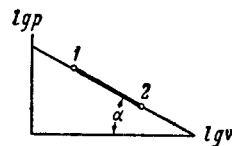


Фиг. 20

вычислении давлений и температур через показатель n относительная погрешность в определении их будет превышать относительную погрешность в определении n примерно в 2—3 раза.

При вычислении работы относительная погрешность того же порядка, что и относительная погрешность определения n .

Особенно велика может быть относительная погрешность при вычислении теплоты процесса, когда показатель политропы близок к показателю адиабаты; в этом случае она может превышать погрешность n во много раз.

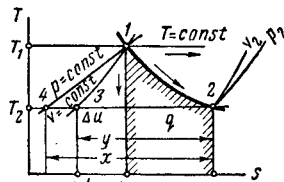


Фиг. 21

Приращение энтропии $ds = c \frac{dT}{T} \frac{\text{ккал.}}{\text{кг} \cdot \text{град.}}$,

$$s_2 - s_1 = c_m \int_{T_1}^{T_2} \ln \frac{T_2}{T_1}; \text{ характер протекания}$$

процесса в диаграмме $T-s$ определяется значением n ; протекание процессов при $n = \infty$, $n = 0$, $n = 1$, $n = k$ дано выше, при рассмотрении процессов $v = \text{const}$, $p = \text{const}$,



Фиг. 22

$T = \text{const}$, $dq = 0$ и $q = 0$, которые могут рассматриваться как частные случаи политропы.

Пример. На фиг. 22 1-2 — политропа при $1 < n < k$, процесс расширения. Площадь под кривой процесса $m-1-2-n-m$ определяет теплоту его, $q > 0$ (так как $ds > 0$); площадь $m-1-3-n'-m$ (площадь под изохорой 1-3) — изменение внутренней энергии Δu в процессе 1-2. Здесь $\Delta u < 0$ (так как $T_2 < T_1$). На основании уравнения $q = (u_2 - u_1) + A l$, учитывая знаки, имеем: площадь $n'-3-1-2-n-n'$ выражает работу $A l > 0$ (процесс расширения).

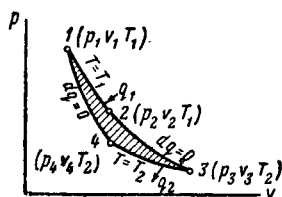
По кривой процесса 1-2 показатель n определяется как отношение приращений энтропии в изо-

термических процессах между изобарами крайних точек процесса и изохорами тех же точек, т. е.

$$n = \frac{s_4 - s_2}{s_3 - s_2} = \frac{x}{y}.$$

Циклы. В термодинамике цикл — замкнутый круговой процесс, в результате которого тело, выйдя из своего исходного состояния, возвращается к нему. Процессы, представляющие отдельные участки цикла, осуществляются квазистатически, т. е. они могут быть отождествлены с непрерывным рядом следующих друг за другом равновесных состояний тела, сколь угодно близких между собой. При этих условиях как отдельные элементы цикла, так и цикл в целом обратимы.

Последовательное повторение цикла произвольно большое число раз приводит к не-



Фиг. 23

прерывному действию машины, осуществляющей цикл. Вследствие цикличности процесса габариты машины определяются предельными изменениями объема рабочего тела при выполнении одного цикла. Осуществление цикла требует наличия тепловых источников, играющих роль теплоотдатчиков и теплоприемников; экономика цикла машины двигателя определяется термодинамическим к. п. д.

$$\eta_t = 1 - \frac{\sum Q_2}{\sum Q_1},$$

где $\sum Q_1$ — количества теплоты, получаемые от теплоотдатчиков;

$\sum Q_2$ — количества теплоты, отдаваемые теплоприемникам.

Работа цикла

$$AL = \sum Q_1 - \sum Q_2.$$

Цикл Карно. Протекание цикла для газа, подчиняющегося уравнению $pV = RT$, дано на фиг. 23.

Цикл составляется двумя изотермами: 1—2—изотерма расширения, 3—4—изотерма сжатия, и двумя адиабатами: 2—3—адиабата расширения, 4—1—адиабата сжатия. Осуществление цикла требует теплоотдатчика при температуре T_1 , совпадающей с температурой газа по изотерме 1—2, и теплоприемника с температурой T_2 , совпадающей с температурой изотермы 3—4.

Соотношения параметров на отдельных участках:

по изотерме 1—2

$$T = T_1, \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{p_2}{p_1};$$

по адиабате 2—3

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^{k-1} = \left(\frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}};$$

по изотерме 3—4

$$T = T_2, \quad \frac{v_3}{v_4} = \frac{p_4}{p_3};$$

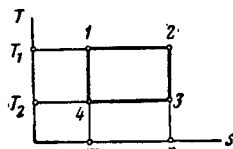
по адиабате 4—1

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_4}{v_1} \right)^{k-1} = \left(\frac{p_1}{p_4} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

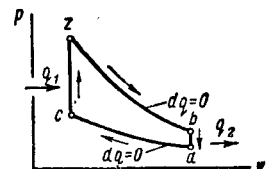
Термодинамический к. п. д.

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

не зависит от природы рабочего тела и опре-



Фиг. 24



Фиг. 25

деляется лишь отношением $\frac{T_2}{T_1}$ — абсолютных температур теплоприемника T_2 и теплоотдатчика T_1 .

Работа цикла

$$AL = q_1 - q_2 = q_1 \cdot \eta_t =$$

$$= ART_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \ln \frac{v_2}{v_1} \text{ [ккал/кг];}$$

$$l = RT_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \ln \frac{v_2}{v_1} \text{ [кдж/кг]}$$

на диаграмме $p-v$ определяется площадью замкнутого контура цикла 1—2—3—4—1.

В координатах $T-s$ (фиг. 24) цикл представлен прямоугольником 1—2—3—4—1, q_1 — площадью $m-1-2-n-m$, q_2 — площадью $m-4-3-n-m$, AL — площадью 1—2—3—4—1;

$$q_1 = T_1 (s_2 - s_1), \quad |q_2| = T_2 (s_2 - s_1),$$

$$AL = (T_1 - T_2) (s_2 - s_1).$$

Характеристики других циклов. Фиг.

25 и 26 схематически представляют цикл, образованный: двумя

изохорами, $c-a$ с подводом теплоты q_1 , $b-a$ с отнятием теплоты q_2

и двумя адиабатами, $z-b$ — адиабатой расширения, $a-c$ — адиабатой сжатия.

Теоретическая машина, осуществляющая этот цикл, принимается идеальной абстракцией, к которой могут приближаться действительные двигатели внутреннего сгорания

низкого сжатия. Цикл в старой литературе без достаточных оснований называли циклом Отто, что должно быть рассматриваемо как условность.

Соотношения параметров на отдельных участках:

по изотерме 1—2

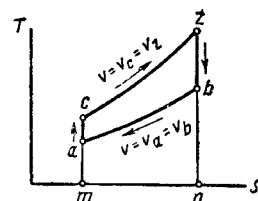
по адиабате 2—3

по изотерме 3—4

по адиабате 4—1

Термодинамический к. п. д.

не зависит от природы рабочего тела и опре-



Фиг. 26

по адиабате сжатия $a-c$

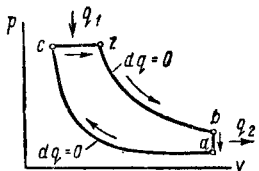
$$\frac{T_c}{T_a} = \varepsilon^{k-1}, \quad \frac{p_c}{p_a} = \varepsilon^k;$$

по изохоре $c-z$

$$\frac{T_z}{T_c} = \frac{p_z}{p_c} = \lambda;$$

по адиабате $z-b$

$$\frac{T_b}{T_z} = \varepsilon^{k-1}, \quad \frac{p_b}{p_z} = \varepsilon^k;$$



Фиг. 27

по изохоре $b-a$

$$\frac{T_b}{T_a} = \frac{p_b}{p_a} = \lambda,$$

где $\varepsilon = \frac{v_a}{v_c}$ — степень сжатия;

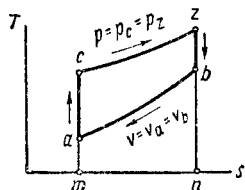
$\lambda = \frac{p_z}{p_c}$ — степень повышения давления.

Термодинамический к. п. д. $\eta_k = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$

(при выводе теплоёмкость c_v принята постоянной для всего цикла), $q_1 = c_v (T_z - T_c)$; $q_2 = c_v (T_b - T_a)$; $Al = c_v (T_z - T_c - T_b + T_a)$.

На диаграмме $T-s$: q_1 представлено площадью $m-c-z-n-m$, q_2 — площадью $m-a-b-n-m$, Al — площадью $a-c-z-b-a$.

Фиг. 27 и 28 представляют схематически цикл, образованный: изобарой $c-z$ с под-



Фиг. 28

водом теплоты q_1 , изохорой $b-a$ с отнятием теплоты q_2 и двумя адиабатами, $a-c$ — адиабатой сжатия, $z-b$ — адиабатой расширения.

Цикл обычно называют циклом Дизеля, что не вполне точно, ибо теоретические циклы, выдвинутые Р. Дизелем, не совпадают с рассматриваемым.

Таким образом, цикл, данный на фиг. 27 и 28, вошёл в термодинамику не как теоретический цикл, выдвинутый Р. Дизелем, а как более поздняя термодинамическая абстракция, развившаяся из анализа рабочего процесса уже осуществлённого компрессорного двигателя Дизеля.

Соотношения параметров:

по адиабате $a-c$

$$\frac{T_c}{T_a} = \varepsilon^{k-1}, \quad \frac{p_c}{p_a} = \varepsilon^k;$$

по изобаре $c-z$

$$\frac{T_z}{T_c} = \rho, \quad p_z = p_c;$$

по адиабате $z-b$

$$\frac{T_b}{T_z} = \frac{\varepsilon^{k-1}}{\rho^{k-1}}, \quad \frac{p_b}{p_z} = \frac{\varepsilon^k}{\rho^k};$$

по изохоре $b-a$

$$\frac{T_b}{T_a} = \rho^k, \quad \frac{p_b}{p_a} = \rho^k,$$

где ε — степень сжатия;

ρ — степень предварительного расширения.

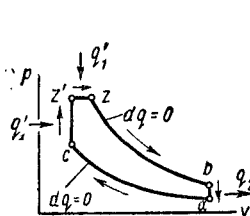
Термодинамический к. п. д.

$$\eta_k = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \cdot \varepsilon^{k-1} (\rho - 1)},$$

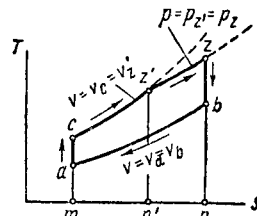
$$q_1 = c_p (T_z - T_c),$$

$$q_2 = c_v (T_b - T_a),$$

$$Al = c_p (T_z - T_c) - c_v (T_b - T_a).$$



Фиг. 29



Фиг. 30

На диаграмме $T-s$ q_1 представлено площадью $m-c-z-n-m$, q_2 — площадью $m-a-b-n-m$, Al — площадью $a-c-z-b-a$.

Фиг. 29 и 30 схематически представляют цикл, образованный процессами: $a-c$ — адиабата сжатия, $c-z$ — изохора с подводом теплоты q_1 ккал/кг, $z-b$ — адиабата расширения, $b-a$ — изохора с отводом тепла q_2 ккал/кг.

Теоретическая машина, осуществляющая этот цикл, принимается идеальной абстракцией, к которой могут приближаться действительные двигатели внутреннего сгорания высокого сжатия с бескомпрессорной подачей топлива (бескомпрессорные дизели).

Рассматриваемый цикл часто называют циклом Сабатэ, что не является достаточно обоснованным. Термодинамическая идея этого цикла является просто теоретическим отображением тех изменений в процессе сгорания, которые произошли при переходе в двигателях внутреннего сгорания от компрессорной подачи топлива к бескомпрессорной.

Соотношения параметров:

по адиабате $a-c$

$$\frac{T_c}{T_a} = \varepsilon^{k-1}, \quad \frac{p_c}{p_a} = \varepsilon^k;$$

по изохоре $c-z'$

$$\frac{T_{z'}}{T_c} = \lambda, \quad \frac{p_{z'}}{p_c} = \lambda;$$

по изобаре $z'-z$

$$\frac{T_z}{T_{z'}} = \rho, \quad p_z = p_{z'},$$

по адиабате $z-b$

$$\frac{T_z}{T_b} = \frac{\varepsilon^{k-1}}{\rho^{k-1}}, \quad \frac{p_z}{p_b} = \frac{\varepsilon^k}{\rho^k};$$

по изохоре $b-a$

$$\frac{T_b}{T_a} = \lambda \cdot \rho^k, \quad \frac{p_b}{p_a} = \lambda \cdot \rho^k.$$

Термодинамический к. п. д.

$$\eta_{it} = 1 - \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]},$$

$$q_1' = c_v(T_{z'} - T_c), \quad q_1'' = c_p(T_z - T_{z'}),$$

$q_2 = c_v(T_b - T_a)$, $Al = c_v(T_{z'} - T_c - T_b + T_a) + c_p(T_z - T_{z'})$ (при выводе теплоёмкости принимаются постоянными).

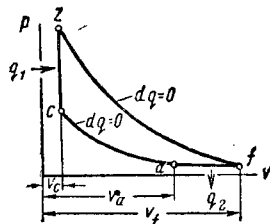
Выражение к. п. д. разбираемого цикла является обобщающим по отношению к двум предыдущим циклам; действительно, при $\rho = 1$ приведённое выражение примет значение

$$\eta_{it} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}},$$

т. е. уже известный к. п. д. цикла низкого сжатия; при $\lambda = 1$ выражение будет иметь вид:

$$\eta_{it} = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \varepsilon^{k-1} (\rho - 1)},$$

т. е. это будет термодинамический к. п. д. цикла высокого сжатия с подводом теплоты по изобаре.



Фиг. 31

На диаграмме $T-s$ q_1' представлено площадью $m-c-z'-n'$, q_1'' — площадью $n'-z'-z-n$, q_2 — площадью $m-a-b-n-m$.

Циклы фиг. 31,

32 образованы

сжатием по адиабате

$a-c$, подводом теплоты по изохоре

$c-z$ (фиг. 31) или по изобаре $c-z$ (фиг. 32),

расширением по адиабате $z-f$ и отводом

теплоты по изобаре $f-a$ (фиг. 31 и 32).

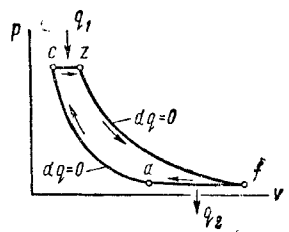
Если в цикле с подводом теплоты по

изохоре (фиг. 31)

$$\frac{v_a}{v_c} = \varepsilon, \quad \frac{v_f}{v_z} = \frac{v_f}{v_c} = \delta,$$

то

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_c}{T_a} &= \varepsilon^{k-1} \\ \frac{T_z}{T_f} &= \delta^{k-1} \\ \frac{T_f}{T_a} &= \frac{\delta}{\varepsilon} \\ \frac{T_z}{T_a} &= \frac{\delta^k}{\varepsilon} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} q_1 &= c_v(T_z - T_c); \\ q_2 &= c_p(T_f - T_a); \\ \eta_{it} &= 1 - k \frac{\delta - \varepsilon}{\delta^k - \varepsilon^k}. \end{aligned}$$



Фиг. 32

Если (фиг. 32) в цикле с подводом теплоты по изобаре $\frac{v_a}{v_c} = \varepsilon$, то

$$\frac{T_c}{T_a} = \varepsilon^{k-1} \text{ и } q_1 = c_p(T_z - T_c) = c_p \cdot T_c \left(\frac{T_z}{T_c} - 1 \right);$$

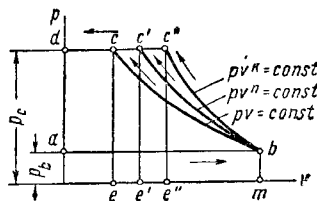
$$q_2 = c_p(T_f - T_a) = c_p \cdot T_a \left(\frac{T_f}{T_a} - 1 \right).$$

Термодинамический коэффициент полезного действия

$$\eta_{it} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_a \left(\frac{T_f}{T_a} - 1 \right)}{T_c \left(\frac{T_z}{T_c} - 1 \right)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}},$$

так как из сравнения адиабат $a-c$ и $z-f$ вытекает, что $\frac{T_f}{T_a} = \frac{T_z}{T_c}$.

Предложенные циклы принимаются абстракцией, к которой приближаются двига-



Фиг. 33

тели внутреннего сгорания с продолженным процессом расширения, как то: газовые турбины, реактивные двигатели, двигатели с непосредственным воздействием давления газов на столб воды (например насосы типа Гемфри).

Приведённые циклы обычно называют циклами Гемфри, хотя цикл, даваемый фиг. 32, называют также циклом Брайтона.

Идеальный компрессор (фиг. 33) — компрессор без вредного пространства; рассмо-

трение потерь действительной машины (трение, гидродинамические и другие потери) исключено: всасывание, наполнение рабочей полости ($a-b$); сжатие по изотерме $b-c$ или по политропе $b-c'$, или по адиабате $b-c''$; выталкивание, удаление сжатого газа $c-d$ (или $c'-d$, или $c''-d$).

Площадь под кривой процесса сжатия ($m-b-c-e-m$ или $m-b-c'-e'-m$, или $m-b-c''-e''-m$) выражает абсолютную работу процесса сжатия за один цикл (работа, затраченная в компрессоре только на одно сжатие газа)

$$l_{сж} = \int_b^c p dv;$$

площадь, ограниченная контуром цикла ($a-b-c-d-a$ или $a-b-c'-d-a$, или $a-b-c''-d-a$), выражает работу компрессора за один цикл (т. е. сумму работ всасывания, сжатия и выталкивания) — l ; соотношение между этими работами: $l = n \cdot l_{сж}$.

Из фиг. 33 следует, что работа цикла при изотермическом сжатии будет меньше.

Значения показателя n :

- а) по изотерме $n=1$;
- б) для двухатомных газов при небольших пределах сжатия по адиабате $n=k=1,4$;
- в) по политропе $1 < n < k$, порядка $1,18-1,2$.

Значение n лимитируется возможностью отвода теплоты к воде, охлаждающей стенки цилиндра (условиями теплопередачи).

Работа цикла на 1 кг сжимаемого газа в зависимости от показателя n будет

$$\begin{aligned} n=1, l_{изотр} &= 2,303 p_b \cdot v_b \lg \frac{p_c}{p_c} = \\ &= 2,303 RT_b \lg \frac{p_b}{p_c} \text{ кдж/кг}; \\ 1 < n < k, l_{политр} &= \frac{n}{n-1} p_b \cdot v_b \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_b} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = \\ &= \frac{n}{n-1} RT_b \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_b} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = \\ &= \frac{n}{n-1} RT_b \left(1 - \frac{T_{c'}}{T_b} \right) \text{ кдж/кг}; \\ n=k, l_{адиаб} &= \frac{k}{k-1} p_b \cdot v_b \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_b} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \\ &= \frac{k}{k-1} RT_b \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_b} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \\ &= \frac{k}{k-1} RT_b \left(1 - \frac{T_{c''}}{T_b} \right) \text{ кдж/кг}. \end{aligned}$$

На диаграмме $T-s$ (фиг. 34) процессы сжатия представлены изотермой $b-c$, политропой $b-c'$, адиабатой $b-c''$.

Для анализа условий работы компрессора по диаграмме $T-s$ используется уравнение первого начала в форме $dq = di - Avdp$ или $q = (i_2 - i_1) + A \int_1^2 -vdp$, удобной для опре-

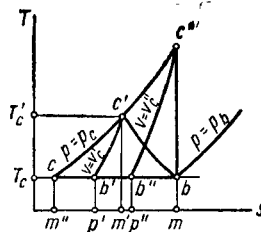
деления работы цикла $Al = A \int_1^2 -vdp$, и уравнения

$$dq = du + Apdv \text{ и } q = (u_2 - u_1) + A \int_1^2 p dv$$

для нахождения работы процесса сжатия

$$Al_{сж} = A \int_1^2 p dv.$$

Применение их приводит к заключениям: для изотермического сжатия ($du=0$, $di=0$) работа процесса сжатия в тепловых единицах $Al_{сж}$, равная работе цикла ($n=1$) $Al_{изотр}$, представлена площадью $m-b-c-m''-m$; для политропического сжатия работа процес-



Фиг. 34

са $Al_{сж, политр}$ — площадью $m-b-c'-b'-m''-m$; работа цикла $Al_{политр}$ — площадью $m-b-c'-c-m''-m$; для адиабатического сжатия ($dq=0$, $q=0$) работа процесса сжатия $Al_{сж, адиаб}$ представлена площадью $m-b-c''-b''-m''-m$; работа цикла $Al_{адиаб}$ — площадью $m-c''-c-m''-m$.

Во всех случаях на диаграмме $T-s$ теплота (q), отводимая в воду, охлаждающую стенки цилиндра компрессора, представлена площадью под кривой процесса сжатия (для изотермы — $m-b-c-m''-m$, для политропы — $m-b-c'-m''-m$, для адиабаты $q=0$);

для изотермы

$$\begin{aligned} q = Al_{сж, изотр} &= Al_{изотр} = \frac{2,303}{427} p_b v_b \lg \frac{p_b}{p_c} = \\ &= \frac{2,303}{427} RT_b \lg \frac{p_b}{p_c}; \end{aligned}$$

для политропы

$$q = c(T_{c'} - T_b) = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_{c'} - T_b).$$

Площадь под изобарой, проходящей в границах изменения температур в процессе (для политропы — под cc' , для адиабаты — под cc''), даёт приращение энтальпии газа при сжатии. Площади под изохорами, ограниченными теми же температурами (для политропы — под $b'c'$, для адиабаты — под $b''c''$), дают изменения внутренней энергии.

Стремление снизить работу цикла и значительное повышение температуры при политропном сжатии (а изотермическое практически не достигается) вызывают переход к многоступенчатому сжатию в компрессоре с промежуточным охлаждением газа при переходе из одной ступени в последующую.

Многоступенчатый идеальный компрессор (фиг. 35, 36). На фиг. 35 работа первой ступени $l_{I,cm}$ представлена площадью $a-b-c-d-a$, второй ступени $l_{II,cm}$ — площадью $d-b'-c'-d'-a$; если

$$y = \sqrt[n]{\frac{p_k}{p_b}} \text{ и } y = \frac{p_b'}{p_b} = \frac{p_b''}{p_b} = \dots,$$

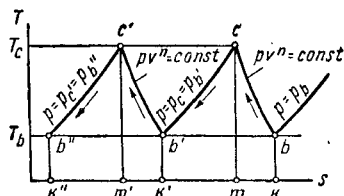
где p_b — давление начала сжатия 1-й ступени, p_k — давление конца сжатия z -й ступени (z — число ступеней), т. е. во всех ступенях отношение давления конца сжатия к давлению начала его делается одинаковым, равным $\sqrt[n]{\frac{p_k}{p_b}}$, и температуры начала сжатия (т. е. в точках b, b', b'', \dots) во всех ступенях одинаковы (T_b), то при одинаковом n во всех ступенях работа каждой ступени:

$$l_{I,cm} = l_{II,cm} = l_{III,cm} \dots = \frac{n}{n-1} \cdot RT_b \left(1 - y^{\frac{n-1}{n}}\right) \text{ кдж/кг.}$$

После каждой ступени газ, нагревшийся за счёт политропного сжатия с повышением давления в y раз до температуры $T_c = T_b \cdot y^{\frac{n-1}{n}}$, поступает в холодильник, где его температура снижается до первоначальной T_b ; процесс охлаждения осуществляется при неизменном давлении, что вызывает уменьшение объёма, пропорциональное паде-

нию абсолютной температуры $\frac{v_{b'}}{v_c} = \frac{v_{b''}}{v_{c'}} = \dots = \frac{T_b}{T_c}$; при этих условиях работа компрессора:

$$l = z \cdot l_{I,cm} = z \cdot \frac{n}{n-1} RT_b \left(1 - y^{\frac{n-1}{n}}\right) \text{ кдж/кг.}$$



Фиг. 36

На диаграмме $T-s$ площадью под кривой $b-c-b'$ представлена работа первой ступени, под кривой $b'-c'-b''$ — второй, ...; $k-b-c-b'-k'-k=k'-b'-c'-b''-k''-k'=\dots$;

площадью под кривой $b-c$ — теплота, отдаваемая газом в охлаждающую воду первой ступени, под кривой $b'-c'$ — то же второй ступени; $k-b-c-m-k=k'-b'-c'-m'-k'=\dots$,

$$q_{I,cm} = q_{II,cm} = c(T_c - T_b) =$$

$$= c_v \frac{n-k}{n-1} (T_c - T_b) \text{ ккал/кг;}$$

площадью под изобарой $b'-c$ — теплота, отдаваемая газом в охлаждающую воду первого промежуточного холодильника $c_p(T_c - T_b)$ ккал/кг; под изобарой $b''-c'$ — то же второго промежуточного холодильника; $m-c-b'-k'-m=m'-c'-b''-k''-m'=\dots$

РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

Отклонения от закона Бойля-Мариотта

Для идеального газа $pv = \text{const}$, т. е. в диаграмме $pv-p$ это будут прямые, параллельные оси p ; каждая прямая, согласно уравнению состояния $pv = RT$, отвечает определённой температуре. Табл. 31 даёт, по опытам Амага, значения pv для O_2, N_2, CO_2, H_2 при $0^\circ C$ при изменении давления от 1 до 2500 ат.

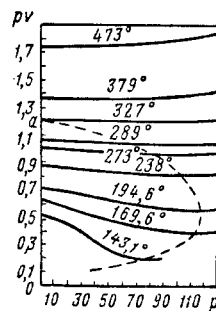
Таблица 31

Значение pv для некоторых газов при $0^\circ C$ по опытам Амага [40]

| Давление в ат | pv кислорода | pv азота | pv углекислоты | pv водорода |
|---------------|----------------|------------|------------------|---------------|
| 1 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 100 | 0,9265 | 0,9910 | 0,202 | 1,0690 |
| 200 | 0,9140 | 1,0390 | 0,385 | 1,1380 |
| 500 | 1,1570 | 1,3900 | 0,891 | 1,3565 |
| 1 000 | 1,7360 | 2,0700 | 1,656 | 1,7250 |
| 2 500 | 3,3233 | 3,9200 | — | 2,6950 |

Только поведение гелия при $0^\circ C$ и изменении p от 1 до 850 ат близко к поведению идеального газа, однако отклонения наблюдаются и здесь. При $0^\circ C$ только водород, гелий, не обнаруживают минимума произведения pv с изменением p ; другие газы при более низких давлениях сжимаются сильнее, а при более высоких давлениях слабее, нежели идеальные газы.

Фиг. 37 даёт характер изменения произведений pv для воздуха. Пунктирная кривая на диаграмме проведена через минимумы значений pv при разных температурах. Верхняя ветвь этой кривой пересекает ось ординат в точке a , определяющей температуру Бойля для газа (для воздуха $54^\circ C$), при которой строго соблюдается закон $pv = \text{const}$, и изотерма, начинающаяся в этой точке, на некотором протяжении будет прямой, параллельной оси абсцисс; изотермы, начинающиеся выше точки a , не проходят через минимум.



Фиг. 37

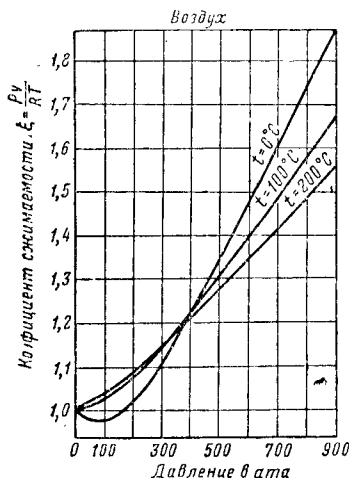
Отклонения от закона Гей-Люссака

Для идеального газа в уравнениях $v = v_0(1 + \alpha t)$ и $p = p_0(1 + \alpha t)$ коэффициент теплового расширения и термический коэффициент давления совпадают и не зависят ни от t ни от p ; у реальных газов эти коэффициенты близки, но не равны между собой и зависят от p и t (см. «Общие тепловые свойства тел» стр. 526).

Уравнение состояния

Уравнение состояния реального газа можно дать так:

$$pv = \xi RT,$$

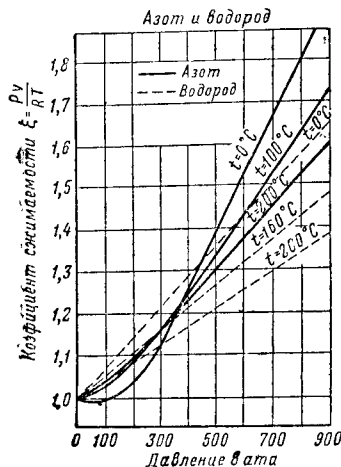


Фиг. 38

где ξ называют коэффициентом сжимаемости, причём для данного газа $\xi = f(p, T)$.

Два состояния газа, подчиняющиеся этому уравнению, будут связаны соотношением

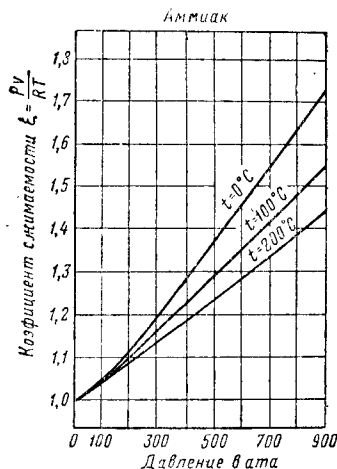
$$\frac{p_1 v_1}{p_2 v_2} = \frac{\xi_1 T_1}{\xi_2 T_2}.$$



Фиг. 39

Фиг. 38, 39, 40, 41 дают коэффициенты сжимаемости ξ воздуха, азота, водорода, аммиака, метана [10].

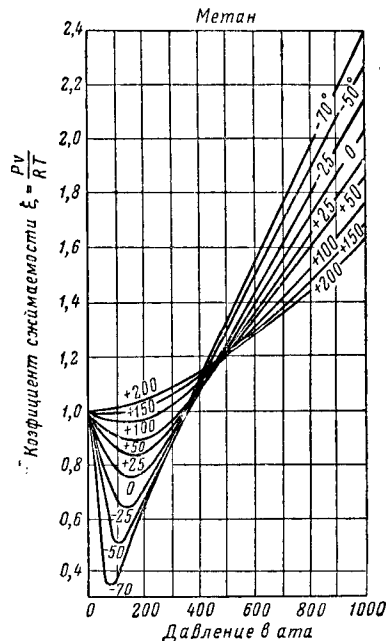
Отклонения от основных законов идеального газа и возможность сжижения реальных газов обнаруживают чрезвычайно сложную природу реального газа. Классической попыткой охватить уравнением состояния свойства реального газа является уравнение Ван-дер-Ваальса (отнесено к молю газа):



Фиг. 40

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT. \quad (1)$$

Здесь b называют кообъёмом; если эффективный радиус молекул r , N — число Аво-

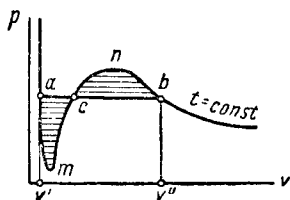


Фиг. 41

гадро, то $b = k \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 N$, и по Ван-дер-Ваальсу $k = 4$ при шарообразной форме молекулы; при форме, отличной от шара, k примет другое значение.

Теоретически при любом давлении газ не может занимать объёма, меньшего b . Таким образом b служит поправкой к уравнению $p v = RT$, связанной с собственным объёмом молекул.

Вторая поправка $\frac{a}{v^2}$ к этому же уравнению учитывает внутреннее давление газа, являющееся следствием взаимного притяжения молекул. Уравнение Ван-дер-Ваальса является уравнением кривой 4-го порядка; оно является кубическим уравнением относительно v и, как таковое, имеет для изотерм при данном p или три действительных корня или два мнимых и один действительный.



Фиг. 42

Для изотерм выше критической изобара пересекает изотерму только один раз (действительный корень, два других мнимые); изотермы ниже критической должны пересекаться изобарами 3 раза (три вещественных корня, см. фиг. 42), наименьший объём (точка a) отвечает жидкости, наибольший — объём сухого насыщенного пара (точка b), средний (точка c) — нереализуемое, лабильное состояние.

Участки изотерм am и bn полуустойчивые метастабильные состояния перегретой воды и переохлаждённого пара, участок mn — состояния неустойчивые, лабильные.

Прямая $a-b$, отвечающая устойчивому равновесию жидкости с её паром, по правилу Максвелла определяется равенством площадей $a-m-c$ и $c-n-b$, ибо работа изотермического цикла $a-m-c-n-b-a$ должна быть равна нулю.

При $v=b$ $p=\infty$, т. е. асимптота кривой Ван-дер-Ваальса параллельна оси p и отстоит от неё на величину b ; когда $v=\infty$, то $p=0$, т. е. вторая асимптота ось v ; для определения пересечения изотермами оси v следует принять $p=0$, что даёт

$$\frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2} = 0,$$

откуда

$$v = \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4abRT}}{2RT}.$$

Точка пересечения будет действительной, если $a^2 > 4abRT$, и при $T < \frac{a}{4bR}$ изотермы перейдут в область отрицательных давлений (для этилового спирта осуществлены до $(-17) \text{ ат}$, для воды и этилового эфира — до (-36 ат) . При $T = \frac{a}{4bR}$ кривая касается оси абсцисс. Максимумы и минимумы на изо-

термах Ван-дер-Ваальса находятся из условия $\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_t = 0$, что даёт

$$p = \frac{av - 2ab}{v^3}; \quad (2)$$

этим уравнением определится кривая, проходящая через максимумы и минимумы, а максимум её, т. е. критическая точка, определяется условием

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial v^2}\right)_t = \frac{6ab - 2av}{v^4} = 0. \quad (3)$$

Совместное решение уравнений (1), (2), (3) с отнесением их к критической точке позволяет связать параметры критического состояния с константами a , b , R и обратно:

$$\begin{aligned} v_k &= 3b; & a &= 3v_k^2 p_k; \\ p_k &= \frac{a}{27b^2}; & b &= \frac{v_k}{3} = \frac{RT_k}{8p_k}; \\ T_k &= \frac{8}{27} \cdot \frac{a}{b \cdot R}; & R &= \frac{8}{3} \cdot \frac{p_k v_k}{T_k}. \end{aligned}$$

Критические параметры и константы a и b , вычисленные по ним, приведены в табл. 32 и 33.

Таблица 32
Термические свойства газов [40]

| Газ | t_k в °C | p_k в ат | $\gamma_k = \frac{1}{v_k} \frac{RT_k}{p_k v_k}$ в г/см³ | $\frac{RT_k}{p_k v_k}$ | t кипения при 1 ат в °C | t плавления в °C |
|----------------------------------|------------|------------|---|------------------------|---------------------------|--------------------|
| He | -267,8 | 2,26 | 0,066 | 3,184 | -268,88 | -272,2 |
| H ₂ | -239,9 | 12,8 | 0,031 | 3,28 | -252,74 | -259,1 |
| Ne | -228,7 | 27,8 | 0,048 | — | -245,9 | -248,7 |
| N ₂ | -147,1 | 33,5 | 0,311 | 3,42 | -195,8 | -209,9 |
| CO | -139 | 34,6 | 0,311 | 3,54 | -191,47 | -204,99 |
| Ar | -122,4 | 48,0 | 0,509 | 3,28 | -185,7 | -189,2 |
| O ₂ | -118,8 | 50,8 | 0,4299 | 3,346 | -182,95 | -181,4 |
| NO | -96 | 64 | — | — | -150,2 | -167 |
| CH ₄ | -82,9 | 45,0 | 0,162 | 3,46 | -161,4 | -183,0 |
| Kr | -62,5 | 54,3 | — | — | -151,7 | -169 |
| C ₂ H ₆ | + 9,5 | 52,4 | 0,22 | — | -103,9 | -169,4 |
| Xe | + 16,6 | 53,2 | 1,155 | 3,62 | -109,1 | -140,0 |
| CO ₂ | + 31,35 | 73,0 | 0,449 | 3,49 | -78,5 | -56,4 |
| N ₂ O | + 36,5 | 71,2 | 0,454 | 3,65 | — | — |
| C ₂ H ₂ | + 34,5 | 50,0 | — | — | -89,2 | -172,1 |
| C ₂ H ₄ | + 35,9 | 61,6 | — | — | -83,9 | -81,8 |
| C ₂ H ₆ | + 95,6 | 45 | — | — | — | -47,7 |
| C ₂ H ₆ | + 102,0 | 48,6 | — | — | -44 | -189,9 |
| Cl ₂ | + 144 | 76,1 | 0,573 | 3,63 | — | — |
| NH ₃ | + 132,4 | 115,8 | 0,236 | — | -33,4 | -77,9 |
| NO ₂ | + 153,2 | 100 | 0,524 | — | + 22,0 | -10 |
| CH ₃ OH | + 240,0 | 78,50 | 0,2722 | 4,559 | — | — |
| C ₂ H ₅ OH | + 288,5 | 47,89 | 0,3045 | 3,755 | — | — |
| C ₂ H ₅ OH | + 243,3 | 62,96 | 0,2755 | 4,115 | — | — |
| H ₂ O | + 374 | 217,5 | — | 4,458 | — | — |
| Воздух | -140,7 | 38,4 | 0,35 | — | -192,0 | -194,4 |

Таблица 33
Значения постоянных a и b в уравнении Ван-дер-Ваальса, вычисленные из критических данных

| Вещества | T_k | p_k в ат | b | a |
|-----------------------------------|-------|------------|-------|----------------------|
| H ₂ O | 647 | 217,5 | 30,55 | $4,47 \cdot 10^6$ |
| C ₂ H ₆ F | 559,6 | 44,62 | 128,5 | $19,98 \cdot 10^6$ |
| CH ₃ COCH ₃ | 505,8 | 52,2 | 99,4 | $13,92 \cdot 10^6$ |
| Cl ₂ | 419,0 | 93,5 | 46,0 | $5,84 \cdot 10^6$ |
| CO ₂ | 304,1 | 73,0 | 42,75 | $3,609 \cdot 10^6$ |
| Ar | 155,6 | 52,9 | 30,2 | $1,308 \cdot 10^6$ |
| O ₂ | 154,2 | 50,8 | 31,18 | $1,332 \cdot 10^6$ |
| N ₂ | 126,0 | 33,5 | 39,6 | $1,345 \cdot 10^6$ |
| H ₂ | 33,18 | 12,80 | 26,70 | $0,244 \cdot 10^6$ |
| He | 5,16 | 2,26 | 23,42 | $0,03253 \cdot 10^6$ |

Приведённые параметры; соответственные состояния

Если за единицу объёма вещества принять объём в критическом состоянии, за единицу давления — критическое давление, за градус индивидуальной температурной шкалы — критическую температуру, то v, p, T некоторого состояния будут выражены долями критических величин

$$\frac{v}{v_k} = \varphi; \quad \frac{p}{p_k} = \pi, \quad \frac{T}{T_k} = \vartheta.$$

Параметры φ, π, ϑ называют приведёнными объёмом, давлением, температурой. Два вещества, определяемые одинаковыми значениями приведённых параметров, нахо-

дятся в соответственных состояниях, они одинаково отклоняются от своих критических состояний.

Приведённое уравнение состояния Ван-дер-Ваальса, общее для всех веществ в газообразном, парообразном и жидком состояниях, получается из обычного уравнения Ван-дер-Ваальса, если в нём обычные параметры и константы выразить через приведённые

$$\left(\pi + \frac{3}{\vartheta^2}\right)(3\varphi - 1) = 8\vartheta.$$

Уравнения Ван-дер-Ваальса хорошо отражают в ряде случаев качественную сторону изменений состояний реального газа, но не дают достаточно точной количественной оценки их для технических расчётов.

ВОДЯНОЙ ПАР

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ; ПАРАМЕТРЫ

В приводимых ниже обозначениях индекс (') отнесён к состоянию жидкости при температуре кипения, отвечающей давлению p , а индекс (") — к состоянию сухого насыщенного пара.

v', v'' [$\text{м}^3/\text{кг}$] — удельные объёмы жидкости и сухого насыщенного пара; x — степень сухости (паросодержание), количество сухого пара в единице (1 кг) влажного пара; v_x [$\text{м}^3/\text{кг}$] — удельный объём влажного пара; q [$\text{ккал}/\text{кг}$] — теплота жидкости; r [$\text{ккал}/\text{кг}$] — теплота парообразования (скрытая); u', i', s' и u'', i'', s'' — внутренняя энергия [$\text{ккал}/\text{кг}$], энтальпия [$\text{ккал}/\text{кг}$], энтропия [$\text{ккал}/\text{кг} \cdot \text{град}$] жидкости при температуре кипения, отвечающей данному давлению p и сухого насыщенного пара; ρ [$\text{ккал}/\text{кг}$] — внутренняя теплота парообразования

$$\rho = u'' - u';$$

ψ [$\text{ккал}/\text{кг}$] — внешняя теплота парообразования

$$\psi = \rho(v'' - v');$$

$$r = \rho + \psi;$$

λ [$\text{ккал}/\text{кг}$] — полная теплота пара сухого насыщенного, $\lambda = q + r$.

Насыщенный пар находится в равновесии с жидкой фазой. Давление его — функция температуры и кривизны поверхности раздела между паром и жидкой фазой, а для растворов ещё и функция концентрации растворённого вещества.

Уравнение Клаузиуса-Клапейрона (см. стр. 531) для процесса парообразования принимает вид

$$\frac{\partial p}{\partial T'} = \frac{r}{AT'(v'' - v')};$$

при пользовании уравнением в узких пределах температур обычно производную $\frac{\partial p}{\partial T'}$

приближённо заменяют отношением $\frac{\Delta p}{\Delta T'}$.

При достаточном удалении от критического состояния возможно пренебречь объёмом жидкости, что даёт

$$\frac{\partial p}{\partial T'} = \frac{r}{AT'v''};$$

если при тех же условиях допустить, что пар подчиняется уравнению

$$p \cdot v'' = RT',$$

то

$$\frac{dp}{p} = d(\ln p) = \frac{r}{AR(T')^2} dT'.$$

Считая для узких пределов температур r не зависящей от температуры, имеем

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{r}{AR} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right).$$

Аналогичные допущения делаются по отношению к уравнению Клаузиуса-Клапейрона и для процесса перехода из твёрдого состояния в пар — сублимации.

Более правильное решение о зависимости давления насыщенных паров жидкостей (твёрдых веществ) от температуры требует учёта функциональной зависимости от температуры для скрытой теплоты парообразования (сублимации).

Насыщенный пар, не содержащий капелек жидкости во взвешенном состоянии, называют сухим насыщенным; содержащий капельки жидкости — влажным. Влажность пара характеризуется степенью сухости (паросодержанием).

Для влажного пара:

объём влажного пара [$\text{м}^3/\text{кг}$]

$$v_x = v'' \cdot x + v' (1 - x),$$

$$v_x \approx v'' \cdot x, \quad \gamma_x \approx \frac{v''}{v' \cdot x};$$

полная теплота влажного пара

$$\lambda_x = q + rx;$$

энтальпия влажного пара

$$i_x = i' + rx;$$

внутренняя энергия влажного пара

$$u_x = u' + \rho x;$$

энтропия влажного пара

$$s_x = s' + \frac{r}{T'} \cdot x,$$

где T' — температура кипения (по абсолютной шкале).

Пар, температура которого выше температуры насыщенного пара, обладающего тем же давлением, называют перегретым (ненасыщенным). Для перегретого пара предложено много уравнений состояния.

Уравнение Тумлира-Линде (1899 — 1905 гг.)

$$v = \frac{RT}{p} - 0,016$$

часто приводится в литературе, но не может использоваться как расчётное, так как поправка к объёму в сравнении с идеальным газом принята постоянной, не зависящей ни от давления, ни от температуры.

Современные уравнения весьма сложны. В таблицах перегретого пара по Коху для вычисления объёма применена формула

$$v = \frac{RT}{p} - \frac{A}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2,82}} - p^2 \left[\frac{B}{\left(\frac{T}{100}\right)^{14}} + \frac{C}{\left(\frac{T}{100}\right)^{31,6}} \right],$$

где

$$R = 47,06 \frac{\text{кгМ}}{\text{кг} \cdot \text{град}};$$

$$A = 0,9172 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$B = 1,3088 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot (\text{М}^2/\text{кг})^2;$$

$$C = 4,379 \cdot 10^7 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot (\text{М}^2/\text{кг})^2.$$

В теории состояния реального вещества имеет значение учение об ассоциации молекул (иногда называемой кажущейся); ассоциация понимается не в химическом смысле, а лишь как объединение нескольких молекул в один агломерат, получающий только некоторые свойства большой молекулы; так, предполагается, что при ассоциации молекул не происходит перегруппировка атомов в одиночных, составляющих молекулах, и индивидуальные свойства каждой из них в основном сохраняются. Однако структура сложной молекулы всё же может лишать составляющие молекулы некоторых степеней свободы. Ассоциация уменьшает число самостоятельных частиц, составляющих газ, и снижает давление газа на стенки сосуда. Уравнение состояния ассоциирующего газа может быть получено из рассмотрения газа как смеси, составленной компонентами с одиночными, двойными, тройными и т. д. молекулами. Сторонники учения считают, что правильным учётом ассоциации можно дать уравнения состояния, полностью отображающие природу реального газа.

Учение начало развиваться с 90-х годов прошлого столетия. М. П. Вукаловичем и И. И. Новиковым [8], [9] получены с учётом ассоциации расчётные уравнения для определения термодинамических параметров водяного пара, послужившие для составления паровых таблиц.

Уравнение состояния для водяного пара имеет вид

$$Pv = RT \left[1 - A(T) \frac{1}{v} - B(T) \frac{1}{v^2} \right],$$

где

$$A(T) = \frac{a}{RT} + \frac{CR}{T \frac{3+2m_2}{2}} - b;$$

$$B(T) = \frac{bCR}{T \frac{3+2m_2}{2}} - 4 \left(1 - \frac{K}{T \frac{3m_2-4m_3}{2}} \right) \rightarrow \rightarrow \left(\frac{CR}{T \frac{3+2m_2}{2}} \right)^2 \left(1 + \frac{3b}{v} \right).$$

Константы R , a , b , C , K , m_2 , m_3 имеют следующие значения:

$$R = 47,053 \frac{\text{кгМ}}{\text{кг} \cdot \text{град}}; a = 63,2 \text{ М}^4/\text{кг};$$

$$b = 0,0009 \text{ м}^3/\text{кг}; K = 21,5; m_2 = 1,968; m_3 = 2,957; C = 405 000.$$

Подстановка значений приводит уравнение к такому виду:

$$P \cdot v = 47,053 T - \frac{1}{v} \left\{ \left(63,2 + \frac{10 390,08}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2,468}} - 0,04235 T \right) + \frac{1}{v} \left[\frac{9,35107}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2,468}} - \left(1 - \frac{21,5}{T^{0,5}} \right) \left(\frac{91 786}{\left(\frac{T}{100}\right)^{5,936}} \right) \left(1 + \frac{0,0027}{v} \right) \right] \right\}.$$

Теплота перегрева

$$q_n = (i_n - i'')_p = \int_{T'}^{T_n} c_p dT \text{ [ккал/кг]};$$

приращение энтропии в процессе перегрева

$$(s_n - s'')_p = \int_{T'}^{T_n} c_p \frac{dT}{T} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right];$$

в приведённых выражениях подстрочный индекс n определяет состояние перегретого пара; T' — абсолютная температура насыщенного пара того же давления.

Изменение внутренней энергии в процессе перегрева

$$u_n - u'' = (i_n - i'') - Ap(v_n - v'') \text{ [ккал/кг]}.$$

Теплоёмкость перегретого пара, функция давления и температуры, аналитически выражается сложными зависимостями, и проще использование табличных данных или графиков (см. табл. 34, 35) фиг. 43 [7].

Полная теплота перегретого пара λ_n включает в себя теплоту жидкости q , теплоту парообразования r и теплоту перегрева q_n , т. е.

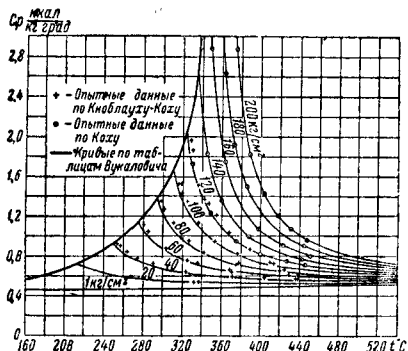
$$\lambda_n = q + r + q_n.$$

Энтальпия жидкости i' связана с теплотой жидкости соотношением

$$i' = q + Apr_0,$$

где v_0 — объём жидкости при 0°C (зависимостью объёма жидкости при 0°C от давления пренебрегают). Для состояний пара, достаточно удалённых от критического состояния, возможно пренебречь разностью $(i' - q)$; такое допущение приводит к приближённым соотношениям:

$$\begin{aligned} i' &\cong q, \\ i_x &\cong \lambda_x, \\ i'' &\cong \lambda, \\ i_n &= \lambda_n. \end{aligned}$$

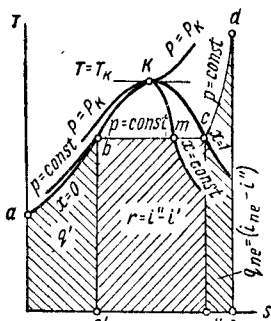


Фиг. 43

Работы конференций по паровым таблицам (Лондон — 1929, Берлин — 1930, Нью-Йорк — 1934) дали скелетные таблицы (см. табл. 36, 37, 38); этим определены наиболее вероятные значения основных величин и возможные отклонения их.

Приводимые ниже паровые табл. 39, 40, 41 взяты из работы М. П. Вукалович «Термодинамические свойства водяного пара», изданной в 1946 г. Таблицы согласованы с нормами и допусками последней Третьей международной конференции по пару; до этого были распространены таблицы Кноблауха, Райша, Хаузена и Коха (1932) [23], Бирюкова (1938) (о них см. у М. П. Вукалович), а в 1937 г. были выпущены таблицы Коха.

Диаграмма $T-s$ (фиг. 44). В диаграмме $T-s$ для пара наносятся нижняя



Фиг. 44

пограничная кривая $a-b-k$, определяющая состояния жидкости при температурах кипения (состояния влажного пара при $x=0$), и верхняя пограничная кривая $k-c$, на ко-

торой располагаются точки, характеризующие состояния сухого насыщенного пара ($x=1$). Обе кривые смыкаются в точке k , выражающей критическое состояние. Между пограничными кривыми располагаются точки, определяющие состояния влажного пара правее верхней пограничной кривой — состояния перегретого пара, левее нижней пограничной кривой — состояния жидкости.

Приращения энтропии для состояний жидкости, находящейся в равновесии с насыщенным паром, т. е. для точек на нижней пограничной кривой, определяют по уравнению

$$s' - s_0 = \int_{T_0}^{T'} c' \frac{dT}{T};$$

здесь c' — теплоёмкость процесса, идущего по нижней пограничной кривой; $T_0 = 273^\circ$ абс.; T' — температура кипения (насыщенного пара); энтропию начального состояния, отвечающего условию равновесия при $T=273^\circ$ абс., обычно принимают равной нулю, тогда

$$s' = \int_{273}^{T'} c' \frac{dT}{T};$$

вдали от критического состояния c' не отличается ощутимо от обычной теплоёмкости жидкости, не сильно зависящей от температуры; при приближении к критическому состоянию c' сильно растёт, обращаясь в этом состоянии в бесконечность. Этим определяется характер нижней пограничной кривой. Изобаро-изотермическому превращению 1 кг жидкости в сухой пар (процесс $b-c$) соответствует приращение энтропии $s'' - s' = \frac{r}{T'}$, что позволяет, имея нижнюю пограничную кривую, построить верхнюю $k-c$ (состояния сухого пара $x=1$).

Изобары в области перегрева (например, $c-d$) определяются уравнением

$$(s_n - s'')_p = \int_{T'}^{T_n} c_p \frac{dT}{T},$$

где T' — температура насыщенного пара;

T_n — температура перегретого пара.

В области жидкости изобары протекают несколько выше нижней пограничной кривой, почти совпадая с последней; это объясняется малым изменением теплоёмкости жидкости в зависимости от условий подвода теплоты к ней и возможностью с большей точностью принимать c_p равным c' . Приращение энтропии

$$s_x - s' = s_m - s' = \frac{r}{T'} \cdot x$$

определяет переход жидкости в изобаро-изотермическом процессе $b-m$ в состояние влажного пара со степенью сухости x , что позволяет находить по диаграмме значение x делением отрезка $b-m$ на $b-c$:

$$x = \frac{bm}{bc};$$

отсюда для построения на диаграмме кривых с постоянной степенью сухости ($x=\text{const}$)

Таблица 34

Истинная теплоемкость перегретого водяного пара при постоянном давлении c_p в ккал/кг °С [7]

| $t^{\circ}\text{C}$ p | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 220 | 240 | 260 | 280 | 300 | 320 | 340 | 360 | 380 | 400 | 420 | 440 | 460 | 480 | 500 | 520 | 540 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,487 | 0,480 | 0,474 | 0,471 | 0,469 | 0,470 | 0,471 | 0,473 | 0,474 | 0,477 | 0,479 | 0,481 | 0,483 | 0,486 | 0,489 | 0,492 | 0,495 | 0,498 | 0,501 | 0,505 | 0,507 | 0,511 | 0,514 |
| 5 | | | | 0,537 | 0,524 | 0,533 | 0,506 | 0,497 | 0,495 | 0,494 | 0,493 | 0,494 | 0,495 | 0,496 | 0,498 | 0,499 | 0,502 | 0,504 | 0,506 | 0,508 | 0,511 | 0,514 | 0,516 |
| 10 | | | | | 0,603 | 0,569 | 0,546 | 0,531 | 0,523 | 0,517 | 0,513 | 0,510 | 0,509 | 0,508 | 0,508 | 0,509 | 0,510 | 0,511 | 0,512 | 0,514 | 0,516 | 0,519 | 0,520 |
| 20 | | | | | | 0,682 | 0,632 | 0,627 | 0,591 | 0,570 | 0,555 | 0,546 | 0,539 | 0,534 | 0,530 | 0,528 | 0,527 | 0,526 | 0,524 | 0,526 | 0,527 | 0,528 | 0,528 |
| 30 | | | | | | | 0,765 | 0,727 | 0,681 | 0,633 | 0,605 | 0,586 | 0,572 | 0,562 | 0,554 | 0,548 | 0,544 | 0,541 | 0,539 | 0,537 | 0,536 | 0,536 | 0,537 |
| 40 | | | | | | | | 0,819 | 0,724 | 0,667 | 0,633 | 0,610 | 0,592 | 0,579 | 0,570 | 0,562 | 0,556 | 0,552 | 0,549 | 0,547 | 0,547 | 0,547 | 0,546 |
| 50 | | | | | | | | | 0,854 | 0,757 | 0,693 | 0,652 | 0,626 | 0,607 | 0,593 | 0,582 | 0,574 | 0,568 | 0,563 | 0,559 | 0,556 | 0,556 | 0,554 |
| 60 | | | | | | | | | | 0,886 | 0,773 | 0,705 | 0,664 | 0,637 | 0,617 | 0,602 | 0,591 | 0,582 | 0,576 | 0,571 | 0,567 | 0,567 | 0,564 |
| 70 | | | | | | | | | | | 0,906 | 0,786 | 0,716 | 0,674 | 0,645 | 0,625 | 0,610 | 0,598 | 0,589 | 0,582 | 0,576 | 0,576 | 0,572 |
| 80 | | | | | | | | | | | | 0,923 | 0,798 | 0,726 | 0,684 | 0,654 | 0,630 | 0,616 | 0,604 | 0,594 | 0,587 | 0,582 | 0,572 |
| 90 | | | | | | | | | | | | | 0,936 | 0,809 | 0,736 | 0,694 | 0,660 | 0,632 | 0,618 | 0,607 | 0,599 | 0,592 | 0,582 |
| 100 | | | | | | | | | | | | | | 0,946 | 0,819 | 0,746 | 0,702 | 0,673 | 0,651 | 0,634 | 0,621 | 0,610 | 0,601 |
| 110 | | | | | | | | | | | | | | | 0,952 | 0,824 | 0,750 | 0,706 | 0,677 | 0,650 | 0,634 | 0,622 | 0,612 |
| 120 | | | | | | | | | | | | | | | | 0,957 | 0,829 | 0,754 | 0,710 | 0,681 | 0,667 | 0,654 | 0,622 |
| 130 | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,961 | 0,833 | 0,758 | 0,714 | 0,685 | 0,672 | 0,631 |
| 140 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,965 | 0,837 | 0,762 | 0,718 | 0,689 | 0,644 |
| 150 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,969 | 0,841 | 0,766 | 0,722 | 0,693 |
| 160 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,973 | 0,845 | 0,770 | 0,726 |
| 170 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,977 | 0,849 | 0,774 |
| 180 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,981 | 0,853 |
| 190 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,857 |
| 200 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,861 |
| 210 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,865 |
| 220 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,869 |
| 230 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,873 |
| 240 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,877 |
| 250 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,881 |
| 260 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,885 |
| 270 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,889 |
| 280 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,893 |
| 290 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,897 |
| 300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,901 |

По опытным данным ← ————— → по данным автора [7]

Таблица 36

Свойства кипящей воды и насыщенного пара

| Температура в °С | Давление в кг/см² | Допуск ± | Удельный объём | | | | Энтальпия (теплосодержание) | | | |
|---------------------|----------------------|-------------|--------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------------------|-------------|-----------------|-------------|
| | | | жидко- сти в см³/г | допуск ± | пара в см³/г | допуск ± | жидкости ккал/кг | допуск ± | пара ккал/кг | допуск ± |
| 0 | 0,006228 | 0,000006 | 1,00021 | 0,00005 | 206,310 | 210 | 0 | 0 | 597,3 | 0,7 |
| 10 | 0,012513 | 0,000010 | 1,00035 | 0,00010 | 106,410 | 110 | 10,04 | 0,01 | 601,6 | 0,7 |
| 20 | 0,023829 | 0,000020 | 1,00184 | 0,00010 | 57,824 | 58 | 20,63 | 0,02 | 605,9 | 0,6 |
| 30 | 0,043254 | 0,000030 | 1,00442 | 0,00010 | 32,922 | 33 | 37,00 | 0,02 | 610,2 | 0,5 |
| 40 | 0,075204 | 0,000038 | 1,00789 | 0,00010 | 19,543 | 19 | 39,98 | 0,02 | 614,5 | 0,5 |
| 50 | 0,12578 | 0,00006 | 1,0121 | 0,0002 | 12,045 | 12 | 49,95 | 0,03 | 618,9 | 0,5 |
| 60 | 0,20312 | 0,00010 | 1,0171 | 0,0002 | 7,678,3 | 7,7 | 59,4 | 0,03 | 623,1 | 0,5 |
| 70 | 0,31775 | 0,00016 | 1,0223 | 0,0002 | 5,046,3 | 5,0 | 69,93 | 0,03 | 627,3 | 0,5 |
| 80 | 0,48292 | 0,00024 | 1,0290 | 0,0002 | 3,409,2 | 3,4 | 79,95 | 0,04 | 631,4 | 0,5 |
| 90 | 0,71491 | 0,00036 | 1,0359 | 0,0002 | 2,361,5 | 2,4 | 89,98 | 0,05 | 635,3 | 0,5 |
| 100 | 1,03323 | 0 | 1,0435 | 0,0002 | 1,673,2 | 1,7 | 100,04 | 0,05 | 639,1 | 0,5 |
| 110 | 1,4609 | 0,001 | 1,0515 | 0,0004 | 1,210,1 | 1,2 | 110,12 | 0,06 | 642,7 | 0,5 |
| 120 | 2,0245 | 0,0013 | 1,0603 | 0,0004 | 891,65 | 0,89 | 120,25 | 0,06 | 646,2 | 0,5 |
| 130 | 2,7344 | 0,0016 | 1,0697 | 0,0004 | 663,21 | 0,67 | 130,42 | 0,07 | 649,6 | 0,5 |
| 140 | 3,6848 | 0,0021 | 1,0793 | 0,0004 | 508,53 | 0,51 | 140,64 | 0,07 | 652,7 | 0,6 |
| 150 | 4,8535 | 0,0032 | 1,0906 | 0,0004 | 392,46 | 0,39 | 150,92 | 0,08 | 655,7 | 0,7 |
| 160 | 6,3023 | 0,0042 | 1,1021 | 0,0004 | 306,76 | 0,31 | 161,26 | 0,08 | 658,5 | 0,8 |
| 170 | 8,0764 | 0,0053 | 1,1144 | 0,0004 | 242,55 | 0,24 | 171,68 | 0,09 | 661,0 | 0,8 |
| 180 | 10,225 | 0,007 | 1,1275 | 0,0004 | 193,80 | 0,19 | 182,18 | 0,09 | 663,3 | 0,9 |
| 190 | 12,800 | 0,008 | 1,1415 | 0,0004 | 156,32 | 0,16 | 192,78 | 0,10 | 665,2 | 0,9 |
| 200 | 15,857 | 0,008 | 1,1565 | 0,0004 | 127,18 | 0,13 | 203,49 | 0,10 | 666,8 | 0,9 |
| 210 | 19,456 | 0,008 | 1,1726 | 0,0004 | 104,24 | 0,10 | 214,32 | 0,11 | 668,0 | 0,9 |
| 220 | 23,659 | 0,009 | 1,1900 | 0,0004 | 86,070 | 0,086 | 225,29 | 0,11 | 669,0 | 0,9 |
| 230 | 28,531 | 0,010 | 1,2087 | 0,0004 | 71,483 | 0,071 | 236,41 | 0,12 | 669,4 | 0,9 |
| 240 | 34,140 | 0,012 | 1,2291 | 0,0004 | 59,684 | 0,060 | 247,72 | 0,12 | 669,4 | 0,9 |
| 250 | 40,560 | 0,013 | 1,2512 | 0,0004 | 50,061 | 0,050 | 259,23 | 0,13 | 668,9 | 0,9 |
| 260 | 47,866 | 0,015 | 1,2755 | 0,0004 | 42,149 | 0,042 | 270,97 | 0,13 | 667,8 | 0,9 |
| 270 | 56,137 | 0,017 | 1,3023 | 0,0004 | 35,593 | 0,035 | 282,98 | 0,19 | 666,0 | 0,9 |
| 280 | 65,457 | 0,020 | 1,3321 | 0,0004 | 30,122 | 0,030 | 295,30 | 0,20 | 663,6 | 0,9 |
| 290 | 75,917 | 0,022 | 1,3655 | 0,0005 | 25,522 | 0,030 | 307,99 | 0,20 | 660,4 | 0,9 |
| 300 | 87,611 | 0,024 | 1,4036 | 0,0005 | 21,625 | 0,035 | 320,98 | 0,30 | 656,1 | 1,0 |
| 310 | 100,64 | 0,03 | 1,4475 | 0,0005 | 18,300 | 0,035 | 334,63 | 0,40 | 650,8 | 1,2 |
| 320 | 115,12 | 0,03 | 1,4992 | 0,0005 | 15,433 | 0,035 | 349,00 | 0,50 | 644,2 | 1,4 |
| 330 | 131,18 | 0,04 | 1,5619 | 0,0005 | 12,952 | 0,035 | 364,23 | 0,60 | 636,0 | 1,6 |
| 340 | 148,93 | 0,04 | 1,6403 | 0,0005 | 10,764 | 0,035 | 380,69 | 0,70 | 625,6 | 1,8 |
| 350 | 168,63 | 0,04 | 1,7463 | 0,0006 | 8,802 | 0,035 | 398,9 | 0,8 | 611,9 | 2,0 |
| 360 | 190,42 | 0,05 | 1,9066 | 0,0040 | 6,963 | 0,040 | 420,3 | 0,8 | 592,9 | 2,0 |
| 370 | 214,68 | 0,05 | 2,231 | 0,021 | 4,997 | 0,100 | 452,3 | 1,5 | 559,3 | 3,0 |
| 371 | 217,26 | 0,10 | 2,297 | 0,026 | 4,761 | 0,100 | 457,2 | 1,5 | 553,8 | 3,5 |
| 372 | 219,88 | 0,11 | 2,341 | 0,034 | 4,493 | 0,110 | 462,9 | 2,2 | 547,1 | 4,0 |
| 373 | 222,53 | 0,11 | 2,502 | 0,053 | 4,182 | 0,120 | 471,0 | 3,5 | 538,9 | 4,5 |
| 374 | 225,22 | 0,11 | 2,79 | 0,15 | 3,643 | 0,120 | 483,0 | 5,0 | 523,3 | 5,0 |

Таблица 37

Удельный объем воды и перегретого водяного пара в $\text{см}^3/\text{г}$

| Давл. в $\text{кг}/\text{см}^2$ | Температура в $^{\circ}\text{C}$ | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 |
| 1 | 0,00016 0,00005 | 1,01210 0,00020 | 1730 1 | 1975 2 | 2216 2 | 2454 2 | 2691 3 | 2928 3 | 3164 3 | 3400 3 | 3636 4 | 3872 4 |
| 5 | 0,9999 0,0002 | 1,0119 0,0002 | 1,0432 0,0002 | 1,0906 0,0002 | 433,8 0,4 | 484,1 0,5 | 533,2 0,5 | 581,6 0,6 | 629,6 0,6 | 677,4 0,7 | 725,0 0,7 | 772,5 0,8 |
| 10 | 0,9997 0,0002 | 1,0117 0,0002 | 1,0431 0,0002 | 1,0902 0,0002 | 210,4 0,2 | 237,6 0,2 | 263,3 0,3 | 288,2 0,3 | 312,7 0,3 | 337,0 0,3 | 361,4 0,4 | 385,1 0,4 |
| 25 | 0,9989 0,0002 | 1,0110 0,0002 | 1,0422 0,0002 | 1,0893 0,0002 | 1,1556 0,0003 | 89,0 0,1 | 101,1 0,1 | 112,1 0,1 | 122,6 0,1 | 132,7 0,1 | 142,7 0,1 | 152,6 0,2 |
| 50 | 0,9977 0,0002 | 1,0099 0,0002 | 1,0409 0,0002 | 1,0877 0,0002 | 1,1532 0,0003 | 1,2495 0,0004 | 46,41 0,07 | 53,12 0,08 | 59,05 0,09 | 64,60 0,10 | 69,92 0,10 | 75,10 0,12 |
| 75 | 0,9965 0,0002 | 1,0088 0,0002 | 1,0397 0,0002 | 1,0861 0,0002 | 1,1508 0,0003 | 1,2452 0,0004 | 27,48 0,05 | 33,22 0,07 | 37,78 0,08 | 41,83 0,08 | 45,62 0,09 | 49,25 0,10 |
| 100 | 0,9952 0,0002 | 1,0077 0,0002 | 1,0385 0,0002 | 1,0845 0,0002 | 1,1485 0,0003 | 1,2410 0,0004 | 1,3979 0,0007 | 23,03 0,05 | 27,05 0,05 | 30,41 0,06 | 33,45 0,07 | 36,32 0,07 |
| 125 | 0,9940 0,0002 | 1,0067 0,0002 | 1,0372 0,0002 | 1,0824 0,0002 | 1,1462 0,0003 | 1,2369 0,0004 | 1,3877 0,0007 | 16,66 0,03 | 20,53 0,04 | 23,52 0,05 | 26,14 0,05 | 28,55 0,06 |
| 150 | 0,9929 0,0002 | 1,0056 0,0002 | 1,0360 0,0002 | 1,0814 0,0002 | 1,1439 0,0003 | 1,2330 0,0004 | 1,3782 0,0007 | 11,93 0,02 | 16,10 0,03 | 18,90 0,04 | 21,25 0,04 | 23,36 0,05 |
| 200 | 0,9905 0,0002 | 1,0035 0,0002 | 1,0337 0,0002 | 1,0784 0,0002 | 1,1395 0,0003 | 1,2255 0,0004 | 1,3612 0,0007 | 1,671 0,02 | 10,31 0,02 | 13,05 0,03 | 15,11 0,03 | 16,87 0,03 |
| 250 | 0,9882 0,0002 | 1,0015 0,0002 | 1,0314 0,0002 | 1,0755 0,0002 | 1,1353 0,0003 | 1,2184 0,0004 | 1,3462 0,0007 | 1,604 0,02 | 6,366 0,013 | 9,45 0,02 | 11,39 0,02 | 12,96 0,03 |
| 300 | 0,9859 0,0002 | 0,9996 0,0002 | 1,0291 0,0002 | 1,0726 0,0002 | 1,1312 0,0003 | 1,2117 0,0004 | 1,3327 0,0007 | 1,557 0,02 | 3,02 0,01 | 6,98 0,02 | 8,90 0,02 | 10,35 0,02 |
| 350 | 0,9837 0,0002 | 0,9975 0,0002 | 1,0269 0,0002 | 1,0698 0,0002 | 1,1272 0,0003 | 1,2054 0,0004 | 1,3207 0,0007 | 1,521 0,02 | | | | |
| 400 | 0,9814 0,0002 | 0,9956 0,0002 | 1,0247 0,0002 | 1,0670 0,0002 | 1,1234 0,0003 | 1,1994 0,0004 | 1,3097 0,0007 | | | | | |

Вода под давлением

Перегретый пар

Примечания. 1. Удельный объем жидкости при 4°C и при давлении $p = 1 \text{ атм}$ принят равным $1,000027 \text{ см}^3/\text{г}$.2. В таблице из каждых двух чисел верхнее выражает установленную величину, а нижнее допуск (\pm).

Таблица 38

Энтальпия (теплосодержание) воды и перегретого водяного пара в $\text{ккал}/\text{кг}$

| Давл. в $\text{кг}/\text{см}^2$ | Температура в $^{\circ}\text{C}$ | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------------------------|---------------|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 |
| 1 | 0,023 0,005 | 49,97 0,03 | 639,2 0,5 | 663,2 0,5 | 686,5 0,6 | 710,1 0,6 | 734,0 1,2 | 758,0 1,2 | 782,4 1,2 | 807,2 1,2 | 832,3 1,2 | 857,8 2,0 |
| 5 | 0,120 0,005 | 50,05 0,03 | 100,11 0,05 | 150,92 0,08 | 681,9 1,0 | 706,7 1,0 | 731,5 1,2 | 756,1 1,2 | 780,8 1,2 | 805,9 1,2 | 831,3 1,2 | 856,9 2,0 |
| 10 | 0,240 0,005 | 50,15 0,03 | 100,20 0,05 | 151,00 0,08 | 675,1 1,0 | 702,1 1,1 | 728,0 1,2 | 753,5 1,2 | 778,9 1,2 | 804,5 1,2 | 830,1 1,2 | 855,9 2,0 |
| 25 | 0,599 0,005 | 50,45 0,03 | 100,46 0,05 | 151,21 0,08 | 203,6 0,1 | 687,8 1,1 | 718,0 1,2 | 746,3 1,2 | 773,3 1,2 | 800,0 1,2 | 826,5 1,2 | 852,6 2,0 |
| 50 | 1,20 0,01 | 50,96 0,03 | 100,90 0,03 | 151,53 0,08 | 203,8 0,1 | 259,2 0,1 | 698,4 1,2 | 732,9 1,2 | 763,1 1,2 | 791,6 1,2 | 819,9 1,2 | 847,3 2,0 |
| 75 | 1,79 0,01 | 51,46 0,03 | 101,34 0,05 | 151,95 0,08 | 204,1 0,1 | 259,2 0,1 | 672,6 1,2 | 717,6 1,2 | 752,1 1,2 | 783,2 1,2 | 813,1 1,2 | 841,8 2,0 |
| 100 | 2,39 0,01 | 51,96 0,03 | 101,78 0,05 | 152,32 0,08 | 204,3 0,1 | 259,2 0,1 | 621,5 1,3 | 699,5 1,2 | 740,0 1,3 | 774,5 1,3 | 806,0 1,3 | 833,1 2,0 |
| 125 | 2,98 0,01 | 52,46 0,03 | 102,22 0,05 | 152,69 0,08 | 204,6 0,1 | 259,3 0,1 | 319,9 0,3 | 676,7 1,2 | 726,9 1,3 | 765,2 1,3 | 799,1 1,3 | 830,3 2,0 |
| 150 | 3,57 0,01 | 52,95 0,03 | 102,65 0,05 | 153,06 0,08 | 204,8 0,1 | 259,3 0,1 | 319,3 0,3 | 646,8 1,5 | 712,1 1,3 | 753,3 1,3 | 791,8 1,3 | 823,1 2,0 |
| 200 | 4,74 0,01 | 53,96 0,03 | 103,57 0,05 | 153,82 0,08 | 205,2 0,1 | 259,4 0,1 | 318,4 0,3 | 393,1 0,8 | 676,5 2,0 | 733,1 2,0 | 776,0 2,0 | 812,0 2,5 |
| 250 | 5,90 0,01 | 54,96 0,03 | 104,46 0,05 | 154,57 0,08 | 205,8 0,2 | 259,5 0,2 | 317,6 0,3 | 387,6 0,8 | 622,5 2,5 | 707,5 2,5 | 758,8 2,5 | 798,9 3,0 |
| 300 | 7,05 0,01 | 55,96 0,03 | 105,35 0,05 | 155,33 0,08 | 206,2 0,3 | 259,7 0,3 | 317,0 0,3 | 384,0 0,8 | 524,5 3,0 | 677,5 2,5 | 739,7 2,5 | |

Вода под давлением

Перегретый пар

Примечание. Из каждых двух чисел верхнее выражает установленную величину, а нижнее допуск (\pm).

Т а б л и ц а 39

Сухой насыщенный пар (по температурам) [7]

| t' | T' | p | v' | v'' | γ' | t' | t'' | r | s' | s'' |
|------|--------|----------|-----------|----------|-----------|--------|-------|-------|--------|--------|
| 0 | 273,16 | 0,006228 | 0,0010002 | 206,3 | 0,004846 | 0 | 597,2 | 597,2 | 0 | 2,1863 |
| 2 | 275,16 | 0,007193 | 0,0010001 | 180,0 | 0,005557 | 2,01 | 598,0 | 598,0 | 0,0073 | 2,1736 |
| 4 | 277,16 | 0,008289 | 0,0010000 | 157,3 | 0,006353 | 4,02 | 599,0 | 599,0 | 0,0146 | 2,1613 |
| 6 | 279,16 | 0,009530 | 0,0010001 | 137,8 | 0,007257 | 6,03 | 599,8 | 599,8 | 0,0218 | 2,1489 |
| 8 | 281,16 | 0,010932 | 0,0010002 | 121,0 | 0,008267 | 8,04 | 600,7 | 592,7 | 0,0290 | 2,1370 |
| 10 | 283,16 | 0,012513 | 0,0010004 | 106,4 | 0,009396 | 10,04 | 601,6 | 591,6 | 0,0361 | 2,1253 |
| 12 | 285,16 | 0,014291 | 0,0010006 | 93,85 | 0,01066 | 12,04 | 602,5 | 590,5 | 0,0431 | 2,1138 |
| 14 | 287,16 | 0,016289 | 0,0010008 | 82,91 | 0,01206 | 14,04 | 603,4 | 589,4 | 0,0501 | 2,1026 |
| 16 | 289,16 | 0,018527 | 0,0010012 | 73,39 | 0,01363 | 16,04 | 604,3 | 588,3 | 0,0571 | 2,0915 |
| 18 | 291,16 | 0,02103 | 0,0010015 | 65,10 | 0,01536 | 18,04 | 605,1 | 587,1 | 0,0639 | 2,0804 |
| 20 | 293,16 | 0,02383 | 0,0010018 | 57,84 | 0,01725 | 20,03 | 606,0 | 586,0 | 0,0708 | 2,0697 |
| 22 | 295,16 | 0,02694 | 0,0010023 | 51,49 | 0,01942 | 22,03 | 606,9 | 584,9 | 0,0776 | 2,0592 |
| 24 | 297,16 | 0,03041 | 0,0010028 | 45,94 | 0,02177 | 24,02 | 607,8 | 583,8 | 0,0843 | 2,0488 |
| 26 | 299,16 | 0,03426 | 0,0010033 | 41,04 | 0,02437 | 26,01 | 608,6 | 582,6 | 0,0910 | 2,0385 |
| 28 | 301,16 | 0,03853 | 0,0010039 | 36,73 | 0,02723 | 28,01 | 609,5 | 581,5 | 0,0976 | 2,0286 |
| 30 | 303,16 | 0,04325 | 0,0010044 | 32,93 | 0,03036 | 30,00 | 610,4 | 580,4 | 0,1042 | 2,0187 |
| 32 | 305,16 | 0,04847 | 0,0010051 | 29,58 | 0,03380 | 32,00 | 611,3 | 579,3 | 0,1108 | 2,0091 |
| 34 | 307,16 | 0,05423 | 0,0010058 | 26,61 | 0,03758 | 33,99 | 612,1 | 578,1 | 0,1173 | 1,9994 |
| 36 | 309,16 | 0,06057 | 0,0010065 | 23,97 | 0,04171 | 35,99 | 613,0 | 577,0 | 0,1238 | 1,9901 |
| 38 | 311,16 | 0,06755 | 0,0010072 | 21,63 | 0,04622 | 37,98 | 613,9 | 575,9 | 0,1302 | 1,9810 |
| 40 | 313,16 | 0,07520 | 0,0010079 | 19,55 | 0,05114 | 39,98 | 614,7 | 574,7 | 0,1366 | 1,9718 |
| 42 | 315,16 | 0,08360 | 0,0010087 | 17,70 | 0,05650 | 41,97 | 615,6 | 573,6 | 0,1429 | 1,9629 |
| 44 | 317,16 | 0,09279 | 0,0010095 | 16,04 | 0,06233 | 43,97 | 616,4 | 572,4 | 0,1493 | 1,9541 |
| 46 | 319,16 | 0,10284 | 0,0010103 | 14,56 | 0,06867 | 45,96 | 617,2 | 571,2 | 0,1555 | 1,9455 |
| 48 | 321,16 | 0,11382 | 0,0010112 | 13,24 | 0,07553 | 47,95 | 618,1 | 570,1 | 0,1617 | 1,9371 |
| 50 | 323,16 | 0,12578 | 0,0010121 | 12,05 | 0,08298 | 49,95 | 619,0 | 569,0 | 0,1679 | 1,9287 |
| 55 | 328,16 | 0,16351 | 0,0010145 | 9,584 | 0,1043 | 54,94 | 621,0 | 566,1 | 0,1833 | 1,9063 |
| 60 | 333,16 | 0,2031 | 0,0010171 | 7,682 | 0,1302 | 59,94 | 623,2 | 563,3 | 0,1984 | 1,8891 |
| 65 | 338,16 | 0,2550 | 0,0010199 | 6,206 | 0,1611 | 64,93 | 625,2 | 560,3 | 0,2133 | 1,8702 |
| 70 | 343,16 | 0,3177 | 0,0010228 | 5,049 | 0,1981 | 69,93 | 627,3 | 557,4 | 0,2280 | 1,8522 |
| 75 | 348,16 | 0,3931 | 0,0010258 | 4,136 | 0,2418 | 74,94 | 629,3 | 554,4 | 0,2425 | 1,8349 |
| 80 | 353,16 | 0,4829 | 0,0010290 | 3,410 | 0,2933 | 79,95 | 631,3 | 551,3 | 0,2567 | 1,8178 |
| 85 | 358,16 | 0,5894 | 0,0010323 | 2,830 | 0,3534 | 84,96 | 633,2 | 548,2 | 0,2708 | 1,8015 |
| 90 | 363,16 | 0,7149 | 0,0010359 | 2,361 | 0,4235 | 89,98 | 635,1 | 545,1 | 0,2848 | 1,7858 |
| 95 | 368,16 | 0,8619 | 0,0010396 | 1,981 | 0,5045 | 95,01 | 637,0 | 542,0 | 0,2985 | 1,7708 |
| 100 | 373,16 | 1,0332 | 0,0010435 | 1,673 | 0,5977 | 100,04 | 638,9 | 538,9 | 0,3121 | 1,7561 |
| 105 | 378,16 | 1,2318 | 0,0010474 | 1,419 | 0,7045 | 105,08 | 640,7 | 535,6 | 0,3255 | 1,7419 |
| 110 | 383,16 | 1,4609 | 0,0010515 | 1,210 | 0,8265 | 110,12 | 642,5 | 532,4 | 0,3387 | 1,7282 |
| 115 | 388,16 | 1,7239 | 0,0010558 | 1,036 | 0,9650 | 115,18 | 644,3 | 529,1 | 0,3519 | 1,7150 |
| 120 | 393,16 | 2,0245 | 0,0010603 | 0,8914 | 1,122 | 120,3 | 646,0 | 525,7 | 0,3647 | 1,7018 |
| 125 | 398,16 | 2,3666 | 0,0010650 | 0,7701 | 1,299 | 125,3 | 647,7 | 522,4 | 0,3775 | 1,6885 |
| 130 | 403,16 | 2,7544 | 0,0010697 | 0,6680 | 1,496 | 130,4 | 649,4 | 518,9 | 0,3901 | 1,6772 |
| 135 | 408,16 | 3,192 | 0,0010746 | 0,5817 | 1,719 | 135,5 | 650,8 | 515,3 | 0,4026 | 1,6652 |
| 140 | 413,16 | 3,685 | 0,0010798 | 0,5094 | 1,967 | 140,6 | 652,5 | 511,9 | 0,4150 | 1,6539 |
| 145 | 418,16 | 4,237 | 0,0010850 | 0,4459 | 2,243 | 145,8 | 654,0 | 508,2 | 0,4272 | 1,6429 |
| 150 | 423,16 | 4,854 | 0,0010906 | 0,3924 | 2,548 | 150,9 | 655,5 | 504,6 | 0,4395 | 1,6320 |
| 155 | 428,16 | 5,540 | 0,0010963 | 0,3464 | 2,887 | 156,1 | 656,9 | 500,8 | 0,4516 | 1,6214 |
| 160 | 433,16 | 6,302 | 0,0011021 | 0,3068 | 3,260 | 161,3 | 658,3 | 497,0 | 0,4637 | 1,6112 |
| 165 | 438,16 | 7,146 | 0,0011082 | 0,2724 | 3,671 | 166,5 | 659,6 | 493,1 | 0,4756 | 1,6012 |
| 170 | 443,16 | 8,076 | 0,0011144 | 0,2426 | 4,122 | 171,7 | 660,9 | 489,2 | 0,4874 | 1,5914 |
| 175 | 448,16 | 9,101 | 0,0011210 | 0,2166 | 4,617 | 176,9 | 662,1 | 485,2 | 0,4991 | 1,5818 |
| 180 | 453,16 | 10,225 | 0,0011275 | 0,1939 | 5,157 | 182,2 | 663,2 | 481,0 | 0,5107 | 1,5721 |
| 185 | 458,16 | 11,456 | 0,0011345 | 0,1739 | 5,749 | 187,5 | 664,3 | 476,8 | 0,5222 | 1,5629 |
| 190 | 463,16 | 12,800 | 0,0011415 | 0,1564 | 6,392 | 192,8 | 665,3 | 472,5 | 0,5336 | 1,5538 |
| 195 | 468,16 | 14,265 | 0,0011490 | 0,1410 | 7,094 | 198,1 | 666,2 | 468,1 | 0,5449 | 1,5448 |
| 200 | 473,16 | 15,857 | 0,0011565 | 0,1273 | 7,857 | 203,5 | 667,0 | 463,5 | 0,5562 | 1,5358 |
| 210 | 483,16 | 19,456 | 0,0011726 | 0,1043 | 9,585 | 214,3 | 668,3 | 454,0 | 0,5788 | 1,5181 |
| 220 | 493,16 | 23,659 | 0,0011900 | 0,08611 | 11,61 | 225,3 | 669,2 | 443,9 | 0,6010 | 1,5012 |
| 230 | 503,16 | 28,531 | 0,0012088 | 0,07153 | 13,98 | 236,4 | 669,7 | 433,3 | 0,6229 | 1,4848 |
| 240 | 513,16 | 34,140 | 0,0012291 | 0,05970 | 16,75 | 247,7 | 669,6 | 421,9 | 0,6448 | 1,4688 |
| 250 | 523,16 | 40,56 | 0,0012512 | 0,05006 | 19,98 | 259,2 | 669,0 | 409,8 | 0,6667 | 1,4490 |
| 260 | 533,16 | 47,87 | 0,0012755 | 0,04213 | 23,74 | 271,0 | 667,8 | 396,8 | 0,6886 | 1,4297 |
| 270 | 543,16 | 56,14 | 0,0013023 | 0,03557 | 28,11 | 283,0 | 665,9 | 382,9 | 0,7103 | 1,4103 |
| 280 | 553,16 | 65,46 | 0,0013321 | 0,03010 | 33,22 | 295,3 | 663,5 | 368,2 | 0,7321 | 1,3918 |
| 290 | 563,16 | 75,92 | 0,0013655 | 0,02552 | 39,18 | 308,0 | 660,2 | 352,2 | 0,7542 | 1,3737 |
| 300 | 573,16 | 87,61 | 0,0014036 | 0,02163 | 46,24 | 321,0 | 656,1 | 335,1 | 0,7767 | 1,3561 |
| 310 | 583,16 | 100,64 | 0,0014448 | 0,01830 | 54,64 | 334,6 | 650,8 | 316,2 | 0,7994 | 1,3315 |
| 320 | 593,16 | 115,13 | 0,0014909 | 0,01544 | 64,79 | 349,0 | 644,2 | 295,2 | 0,8229 | 1,3206 |
| 330 | 603,16 | 131,18 | 0,0015502 | 0,01295 | 77,20 | 364,2 | 636,0 | 271,8 | 0,8476 | 1,2982 |
| 340 | 613,16 | 148,96 | 0,0016241 | 0,01076 | 92,90 | 380,7 | 625,6 | 244,9 | 0,8734 | 1,2728 |
| 350 | 623,16 | 168,63 | 0,0017147 | 0,008803 | 113,6 | 398,9 | 611,9 | 213,0 | 0,9015 | 1,2433 |
| 355 | 628,16 | 179,24 | 0,001814 | 0,007875 | 127,0 | 409,5 | 603,2 | 193,7 | 0,9173 | 1,2263 |
| 360 | 633,16 | 190,42 | 0,001907 | 0,006963 | 143,6 | 420,9 | 592,8 | 171,9 | 0,9353 | 1,2071 |
| 365 | 638,16 | 202,21 | 0,00203 | 0,00606 | 165,0 | 431,2 | 579,6 | 145,4 | 0,9553 | 1,1833 |
| 370 | 643,16 | 214,68 | 0,00223 | 0,00500 | 200 | 452,3 | 559,3 | 107,0 | 0,9842 | 1,1503 |
| 374 | 647,16 | 225,2 | 0,00279 | 0,00355 | 274 | 488 | 523 | 35 | 1,04 | 1,09 |

Параметры критического состояния

Температура 374,2 °C
 Давление 225,5 кг/см²
 Объем 0,00307 м³/кг

Сухой насыщенный пар (по давлениям) [7]

| p | t' | v' | v'' | γ'' | i' | i'' | r | s' | s'' |
|-------|--------|-----------|----------|------------|--------|-------|-------|--------|--------|
| 0,010 | 6,698 | 0,0010001 | 131,7 | 0,007535 | 6,73 | 600,1 | 593,4 | 0,0243 | 2,1447 |
| 0,015 | 12,737 | 0,0010007 | 89,64 | 0,01116 | 12,78 | 602,8 | 590,0 | 0,0457 | 2,1096 |
| 0,020 | 17,204 | 0,0010013 | 68,27 | 0,01465 | 17,24 | 604,8 | 587,6 | 0,0612 | 2,0847 |
| 0,025 | 20,776 | 0,0010020 | 55,28 | 0,01809 | 20,80 | 606,4 | 585,6 | 0,0735 | 2,0655 |
| 0,030 | 23,772 | 0,0010027 | 46,53 | 0,02149 | 23,79 | 607,7 | 583,9 | 0,0836 | 2,0499 |
| 0,035 | 26,359 | 0,0010034 | 40,23 | 0,02486 | 26,37 | 608,8 | 582,4 | 0,0923 | 2,0366 |
| 0,040 | 28,641 | 0,0010041 | 35,46 | 0,02820 | 28,65 | 609,8 | 581,1 | 0,0993 | 2,0253 |
| 0,045 | 30,69 | 0,0010047 | 31,73 | 0,03152 | 30,69 | 610,7 | 580,0 | 0,1065 | 2,0153 |
| 0,050 | 32,55 | 0,0010053 | 28,73 | 0,03481 | 32,55 | 611,5 | 578,9 | 0,1126 | 2,0064 |
| 0,055 | 35,82 | 0,0010064 | 24,19 | 0,04131 | 35,81 | 612,9 | 577,1 | 0,1232 | 1,9908 |
| 0,070 | 38,66 | 0,0010074 | 20,92 | 0,04780 | 38,64 | 614,1 | 575,5 | 0,1324 | 1,9779 |
| 0,080 | 41,16 | 0,0010084 | 18,45 | 0,05421 | 41,14 | 615,2 | 574,1 | 0,1402 | 1,9661 |
| 0,090 | 43,41 | 0,0010093 | 16,51 | 0,06055 | 43,38 | 616,2 | 572,8 | 0,1474 | 1,9564 |
| 0,10 | 45,45 | 0,0010101 | 14,95 | 0,06688 | 45,41 | 617,0 | 571,6 | 0,1533 | 1,9478 |
| 0,12 | 49,06 | 0,0010116 | 12,60 | 0,07933 | 49,01 | 618,5 | 569,5 | 0,1650 | 1,9326 |
| 0,14 | 52,18 | 0,0010130 | 10,88 | 0,09177 | 52,13 | 619,9 | 567,8 | 0,1747 | 1,9197 |
| 0,16 | 54,84 | 0,0010144 | 9,612 | 0,1040 | 54,88 | 621,1 | 566,2 | 0,1831 | 1,9087 |
| 0,18 | 57,41 | 0,0010157 | 8,615 | 0,1162 | 57,36 | 622,1 | 564,7 | 0,1906 | 1,8990 |
| 0,20 | 59,67 | 0,0010170 | 7,795 | 0,1283 | 59,61 | 623,1 | 563,5 | 0,1974 | 1,8903 |
| 0,22 | 61,74 | 0,0010181 | 7,123 | 0,1403 | 61,67 | 623,9 | 562,2 | 0,2036 | 1,8826 |
| 0,24 | 63,65 | 0,0010191 | 6,563 | 0,1523 | 63,53 | 624,7 | 561,1 | 0,2093 | 1,8753 |
| 0,26 | 65,44 | 0,0010201 | 6,094 | 0,1641 | 65,37 | 625,4 | 560,0 | 0,2146 | 1,8685 |
| 0,28 | 67,11 | 0,0010211 | 5,681 | 0,1759 | 67,04 | 626,1 | 559,1 | 0,2195 | 1,8624 |
| 0,30 | 68,68 | 0,0010221 | 5,328 | 0,1877 | 68,61 | 626,8 | 558,2 | 0,2241 | 1,8567 |
| 0,40 | 75,42 | 0,0010261 | 4,069 | 0,2458 | 75,36 | 629,5 | 554,1 | 0,2437 | 1,8331 |
| 0,50 | 80,86 | 0,0010296 | 3,301 | 0,3029 | 80,81 | 631,6 | 550,8 | 0,2592 | 1,8155 |
| 0,60 | 85,45 | 0,0010326 | 2,783 | 0,3591 | 85,41 | 633,4 | 548,0 | 0,2721 | 1,8001 |
| 0,70 | 89,45 | 0,0010355 | 2,409 | 0,4152 | 89,43 | 634,9 | 545,5 | 0,2832 | 1,7874 |
| 0,80 | 92,99 | 0,0010381 | 2,125 | 0,4705 | 92,99 | 636,2 | 543,2 | 0,2930 | 1,7767 |
| 0,90 | 96,18 | 0,0010405 | 1,864 | 0,5253 | 96,18 | 637,4 | 541,2 | 0,3013 | 1,7673 |
| 1,0 | 99,09 | 0,0010428 | 1,725 | 0,5797 | 99,12 | 638,5 | 539,4 | 0,3096 | 1,7587 |
| 1,5 | 110,79 | 0,0010521 | 1,180 | 0,8472 | 110,92 | 642,8 | 531,9 | 0,34,8 | 1,7230 |
| 2,0 | 119,62 | 0,0010599 | 0,9016 | 1,106 | 119,87 | 645,8 | 525,9 | 0,3638 | 1,7029 |
| 2,5 | 126,79 | 0,0010666 | 0,7316 | 1,367 | 127,2 | 648,3 | 521,1 | 0,3820 | 1,6851 |
| 3,0 | 132,88 | 0,0010725 | 0,6166 | 1,622 | 133,4 | 650,3 | 516,9 | 0,3973 | 1,6703 |
| 3,5 | 138,19 | 0,0010780 | 0,5335 | 1,871 | 138,8 | 651,9 | 513,1 | 0,4106 | 1,6579 |
| 4,0 | 142,92 | 0,0010828 | 0,4706 | 2,125 | 143,6 | 653,4 | 509,8 | 0,4221 | 1,6474 |
| 4,5 | 147,20 | 0,0010875 | 0,4213 | 2,374 | 148,0 | 654,7 | 506,7 | 0,4326 | 1,6380 |
| 5,0 | 151,11 | 0,0010918 | 0,3816 | 2,621 | 152,1 | 655,8 | 503,7 | 0,4422 | 1,6297 |
| 6,0 | 158,08 | 0,0010989 | 0,3213 | 3,112 | 159,3 | 657,8 | 498,5 | 0,4591 | 1,6151 |
| 7,0 | 164,17 | 0,0011072 | 0,2776 | 3,600 | 165,6 | 659,4 | 493,8 | 0,4737 | 1,6029 |
| 8,0 | 169,61 | 0,0011140 | 0,2448 | 4,085 | 171,3 | 660,8 | 489,5 | 0,4865 | 1,5922 |
| 9,0 | 174,53 | 0,0011203 | 0,2189 | 4,568 | 176,4 | 662,0 | 485,6 | 0,4980 | 1,5827 |
| 10,0 | 179,04 | 0,0011262 | 0,1981 | 5,049 | 181,2 | 663,0 | 481,8 | 0,5085 | 1,5740 |
| 12,5 | 198,92 | 0,0011399 | 0,1680 | 6,249 | 191,6 | 665,1 | 473,5 | 0,5311 | 1,5559 |
| 15,0 | 197,36 | 0,0011524 | 0,1343 | 7,446 | 203,6 | 666,6 | 466,0 | 0,5503 | 1,5406 |
| 17,5 | 204,76 | 0,0011641 | 0,1157 | 8,645 | 208,6 | 667,7 | 459,1 | 0,5670 | 1,5275 |
| 20,0 | 211,33 | 0,0011751 | 0,1016 | 9,846 | 215,8 | 668,5 | 452,7 | 0,5820 | 1,5160 |
| 22,5 | 217,39 | 0,0011854 | 0,09049 | 11,05 | 222,4 | 669,0 | 446,6 | 0,5953 | 1,5053 |
| 25,0 | 222,90 | 0,0011952 | 0,08157 | 12,26 | 228,5 | 669,4 | 440,9 | 0,6074 | 1,4962 |
| 27,5 | 228,00 | 0,0012049 | 0,07420 | 13,48 | 234,1 | 669,6 | 435,5 | 0,6185 | 1,4874 |
| 30 | 232,76 | 0,0012142 | 0,06802 | 14,70 | 239,5 | 669,7 | 430,2 | 0,6290 | 1,4793 |
| 35 | 241,42 | 0,0012320 | 0,05822 | 17,18 | 249,4 | 669,5 | 420,1 | 0,6479 | 1,4645 |
| 40 | 249,13 | 0,0012493 | 0,05078 | 19,69 | 258,2 | 669,0 | 410,8 | 0,6649 | 1,4513 |
| 45 | 256,23 | 0,0012651 | 0,04495 | 22,25 | 266,5 | 668,2 | 401,7 | 0,6803 | 1,4392 |
| 50 | 262,70 | 0,0012823 | 0,04024 | 24,85 | 274,2 | 667,3 | 393,1 | 0,6944 | 1,4280 |
| 55 | 268,69 | 0,0012989 | 0,03636 | 27,50 | 281,4 | 666,2 | 384,8 | 0,7075 | 1,4176 |
| 60 | 274,29 | 0,0013150 | 0,03310 | 30,21 | 288,4 | 665,0 | 376,6 | 0,7196 | 1,4078 |
| 65 | 279,54 | 0,0013307 | 0,03033 | 32,97 | 294,8 | 663,6 | 368,8 | 0,7311 | 1,3986 |
| 70 | 284,48 | 0,0013467 | 0,02795 | 35,78 | 300,9 | 662,1 | 361,2 | 0,7420 | 1,3897 |
| 75 | 289,17 | 0,0013625 | 0,02587 | 38,66 | 307,0 | 660,5 | 353,5 | 0,7524 | 1,3813 |
| 80 | 293,62 | 0,0013786 | 0,02401 | 41,60 | 312,6 | 658,9 | 346,3 | 0,7623 | 1,3731 |
| 85 | 297,86 | 0,0013951 | 0,02241 | 44,62 | 318,2 | 657,0 | 338,8 | 0,7718 | 1,3654 |
| 90 | 301,92 | 0,001412 | 0,02096 | 47,71 | 323,6 | 655,1 | 331,5 | 0,7810 | 1,3577 |
| 95 | 305,80 | 0,001428 | 0,01961 | 50,91 | 328,8 | 653,2 | 324,4 | 0,7893 | 1,3500 |
| 100 | 309,53 | 0,001445 | 0,01845 | 54,21 | 334,0 | 651,1 | 317,1 | 0,7983 | 1,3421 |
| 110 | 316,58 | 0,001480 | 0,01637 | 61,08 | 344,0 | 646,7 | 302,7 | 0,8147 | 1,3279 |
| 120 | 323,15 | 0,001518 | 0,01462 | 68,42 | 353,9 | 641,9 | 288,0 | 0,8306 | 1,3133 |
| 130 | 329,30 | 0,001558 | 0,01312 | 76,23 | 363,0 | 636,6 | 273,6 | 0,8458 | 1,2998 |
| 140 | 335,09 | 0,001599 | 0,01181 | 84,63 | 372,4 | 631,0 | 259,6 | 0,8606 | 1,2853 |
| 150 | 340,56 | 0,001646 | 0,01065 | 93,90 | 381,7 | 624,9 | 245,2 | 0,8749 | 1,2713 |
| 160 | 345,74 | 0,001699 | 0,009616 | 104,0 | 390,8 | 618,3 | 227,5 | 0,8892 | 1,2561 |
| 170 | 350,66 | 0,001756 | 0,008639 | 115,2 | 400,3 | 610,8 | 210,5 | 0,9035 | 1,2411 |
| 180 | 355,35 | 0,001821 | 0,007809 | 128,0 | 410,2 | 602,5 | 192,3 | 0,9186 | 1,2261 |
| 190 | 359,82 | 0,001902 | 0,006994 | 143,0 | 420,4 | 593,2 | 172,8 | 0,9347 | 1,2081 |
| 200 | 364,08 | 0,00201 | 0,00620 | 161,2 | 431,5 | 582,3 | 150,8 | 0,9514 | 1,1833 |
| 210 | 368,16 | 0,00214 | 0,00530 | 185,7 | 444,7 | 568,1 | 123,4 | 0,9714 | 1,1636 |
| 220 | 372,1 | 0,00239 | 0,00419 | 223 | 463,4 | 547 | 84 | 1,002 | 1,131 |
| 222 | 372,8 | 0,00243 | 0,00425 | 235 | 469 | 541 | 72 | 1,009 | 1,120 |
| 224 | 373,6 | 0,00261 | 0,00391 | 254 | 478 | 532 | 54 | 1,022 | 1,10 |

Таблица 41

Вода и перегретый пар [7]

| t | 0,01 ата | | | 0,03 ата | | | 0,05 ата | | | 0,10 ата | | |
|-----|--|-------|--------|---|-------|--------|--|-------|--------|--|-------|--------|
| | t' = 6,698 v'' = 131,7 i'' = 600,1 s'' = 2,1147 | | | i' = 23,772 v'' = 46,53 i'' = 607,7 s'' = 2,0499 | | | t' = 32,55 v'' = 28,73 i'' = 611,5 s'' = 2,0064 | | | i' = 45,45 v'' = 14,95 i'' = 617,0 s'' = 1,9478 | | |
| | v | i | s | v | i | s | v | i | s | v | i | s |
| 0 | 0,0010002 | 0,0 | 0,0000 | 0,0010002 | 0,0 | 0,0000 | 0,0010002 | 0,0 | 0,0000 | 0,0010002 | 0,0 | 0,0000 |
| 10 | 133,2 | 602,2 | 2,1507 | 0,0010003 | 10,0 | 0,0361 | 0,0010003 | 10,0 | 0,0361 | 0,0010003 | 10,0 | 0,0361 |
| 20 | 137,9 | 606,7 | 2,1662 | 0,0010018 | 20,0 | 0,0708 | 0,0010018 | 20,0 | 0,0708 | 0,0010018 | 20,0 | 0,0708 |
| 30 | 142,6 | 611,2 | 2,1812 | 47,50 | 611,0 | 2,0595 | 0,0010044 | 30,0 | 0,1042 | 0,0010044 | 30,0 | 0,1042 |
| 40 | 147,3 | 615,7 | 2,1957 | 49,08 | 615,5 | 2,0741 | 29,42 | 615,4 | 2,0175 | 0,0010070 | 40,0 | 0,1365 |
| 50 | 152,0 | 620,1 | 2,2093 | 50,65 | 620,0 | 2,0832 | 30,36 | 619,9 | 2,0316 | 15,16 | 619,6 | 1,9546 |
| 60 | 156,8 | 624,6 | 2,2235 | 52,22 | 624,5 | 2,1019 | 31,31 | 621,1 | 2,0453 | 15,64 | 624,1 | 1,9685 |
| 70 | 161,5 | 629,1 | 2,2368 | 53,79 | 629,0 | 2,1152 | 32,25 | 629,0 | 2,0587 | 16,11 | 628,7 | 1,9818 |
| 80 | 166,2 | 633,6 | 2,2497 | 55,36 | 633,6 | 2,1281 | 33,19 | 633,5 | 2,0716 | 16,58 | 633,3 | 1,9948 |
| 90 | 170,9 | 638,1 | 2,2622 | 56,93 | 638,1 | 2,1407 | 34,14 | 633,0 | 2,0842 | 17,06 | 637,8 | 2,0075 |
| 100 | 175,6 | 642,6 | 2,2744 | 58,51 | 642,6 | 2,1529 | 35,08 | 642,5 | 2,0964 | 17,53 | 642,3 | 2,0198 |
| 110 | 180,3 | 647,1 | 2,2863 | 60,07 | 647,1 | 2,1648 | 36,02 | 647,0 | 2,1084 | 18,00 | 646,8 | 2,0317 |
| 120 | 185,0 | 651,6 | 2,2979 | 61,64 | 651,6 | 2,1765 | 36,96 | 651,5 | 2,1209 | 18,47 | 651,3 | 2,0434 |
| 130 | 189,7 | 656,2 | 2,3092 | 63,21 | 656,1 | 2,1879 | 37,91 | 656,1 | 2,1314 | 18,94 | 655,9 | 2,0548 |
| 140 | 194,4 | 660,7 | 2,3203 | 64,79 | 660,7 | 2,1993 | 38,85 | 660,6 | 2,1425 | 19,42 | 660,4 | 2,0659 |
| 150 | 199,1 | 665,2 | 2,3312 | 66,35 | 665,2 | 2,2099 | 39,79 | 665,2 | 2,1534 | 19,89 | 665,0 | 2,0763 |
| 160 | 203,8 | 669,8 | 2,3418 | 67,92 | 669,8 | 2,2205 | 40,73 | 669,8 | 2,1641 | 20,36 | 669,5 | 2,0875 |
| 170 | 208,5 | 674,4 | 2,3522 | 69,49 | 674,4 | 2,2309 | 41,68 | 674,3 | 2,1745 | 20,83 | 674,1 | 2,0979 |
| 180 | 213,2 | 678,9 | 2,3624 | 71,06 | 678,9 | 2,2411 | 42,62 | 678,9 | 2,1847 | 21,30 | 678,7 | 2,1081 |
| 190 | 218,0 | 683,5 | 2,3724 | 72,63 | 683,5 | 2,2511 | 43,56 | 683,4 | 2,1947 | 21,77 | 683,3 | 2,1181 |
| 200 | 222,7 | 688,1 | 2,3822 | 74,20 | 688,1 | 2,2609 | 44,50 | 688,1 | 2,2045 | 22,24 | 687,9 | 2,1279 |
| 210 | 227,4 | 692,7 | 2,3918 | 75,77 | 692,7 | 2,2706 | 45,44 | 692,7 | 2,2141 | 22,72 | 692,5 | 2,1375 |
| 220 | 232,1 | 697,3 | 2,4013 | 77,34 | 697,3 | 2,2800 | 46,39 | 697,3 | 2,2236 | 23,19 | 697,1 | 2,1470 |
| 230 | 236,8 | 701,9 | 2,4106 | 78,91 | 701,9 | 2,2893 | 47,33 | 701,9 | 2,2329 | 23,66 | 701,7 | 2,1563 |
| 240 | 241,5 | 706,6 | 2,4197 | 80,48 | 706,6 | 2,2984 | 48,27 | 706,5 | 2,2420 | 24,13 | 706,4 | 2,1655 |
| 250 | 246,2 | 711,2 | 2,4286 | 82,05 | 711,2 | 2,3071 | 49,21 | 711,2 | 2,2510 | 24,60 | 711,1 | 2,1745 |
| 260 | 250,9 | 715,9 | 2,4375 | 83,62 | 715,9 | 2,3163 | 50,15 | 715,9 | 2,2599 | 25,07 | 715,7 | 2,1833 |
| 270 | 255,6 | 720,6 | 2,4462 | 85,19 | 720,6 | 2,3250 | 51,09 | 720,6 | 2,2686 | 25,54 | 720,4 | 2,1920 |
| 280 | 260,3 | 725,3 | 2,4547 | 86,76 | 725,3 | 2,3335 | 52,04 | 725,3 | 2,2771 | 26,02 | 725,1 | 2,2006 |
| 290 | 265,0 | 729,9 | 2,4632 | 88,33 | 729,9 | 2,3419 | 52,98 | 729,9 | 2,2856 | 26,49 | 729,8 | 2,2091 |
| 300 | 269,7 | 734,6 | 2,4715 | 89,90 | 734,6 | 2,3502 | 53,92 | 734,6 | 2,2939 | 26,96 | 734,5 | 2,2174 |
| 310 | 274,4 | 739,3 | 2,4797 | 91,46 | 739,3 | 2,3581 | 54,86 | 739,3 | 2,3021 | 27,43 | 739,2 | 2,2256 |
| 320 | 279,1 | 744,1 | 2,4878 | 93,03 | 744,1 | 2,3665 | 55,80 | 744,1 | 2,3102 | 27,90 | 743,9 | 2,2337 |
| 330 | 283,8 | 748,9 | 2,4957 | 94,60 | 748,9 | 2,3745 | 56,74 | 748,9 | 2,3181 | 28,37 | 743,7 | 2,2417 |
| 340 | 288,6 | 753,7 | 2,5036 | 96,17 | 753,6 | 2,3821 | 57,69 | 753,6 | 2,3260 | 28,84 | 743,5 | 2,2496 |
| 350 | 293,3 | 758,5 | 2,5113 | 97,74 | 758,5 | 2,3901 | 58,63 | 753,4 | 2,3338 | 29,31 | 753,3 | 2,2574 |
| 360 | 298,0 | 763,3 | 2,5190 | 99,31 | 763,3 | 2,3977 | 59,57 | 763,3 | 2,3415 | 29,78 | 763,1 | 2,2650 |
| 370 | 302,7 | 768,1 | 2,5266 | 100,9 | 763,1 | 2,4051 | 60,51 | 763,1 | 2,3491 | 30,25 | 763,0 | 2,2726 |
| 380 | 307,4 | 773,0 | 2,5341 | 102,5 | 773,0 | 2,4129 | 61,46 | 773,0 | 2,3566 | 30,72 | 772,8 | 2,2801 |
| 390 | 312,1 | 777,9 | 2,5415 | 104,0 | 777,8 | 2,4203 | 62,40 | 777,8 | 2,3640 | 31,19 | 777,7 | 2,2876 |
| 400 | 316,8 | 782,8 | 2,5488 | 105,6 | 782,7 | 2,4276 | 63,33 | 782,7 | 2,3713 | 31,67 | 782,6 | 2,2949 |
| 410 | 321,5 | 787,7 | 2,5560 | 107,2 | 787,7 | 2,4349 | 64,27 | 787,7 | 2,3786 | 32,14 | 787,5 | 2,3021 |
| 420 | 326,2 | 792,6 | 2,5632 | 108,7 | 792,6 | 2,4421 | 65,21 | 792,6 | 2,3858 | 32,61 | 792,5 | 2,3093 |
| 430 | 330,9 | 797,6 | 2,5703 | 110,3 | 797,6 | 2,4492 | 66,15 | 797,6 | 2,3929 | 33,08 | 797,4 | 2,3164 |
| 440 | 335,6 | 802,6 | 2,5773 | 111,9 | 802,6 | 2,4562 | 67,09 | 802,6 | 2,4000 | 33,55 | 802,4 | 2,3235 |
| 450 | 340,3 | 807,6 | 2,5843 | 113,4 | 807,6 | 2,4633 | 68,03 | 807,6 | 2,4070 | 34,02 | 807,4 | 2,3305 |
| 460 | 345,0 | 812,6 | 2,5912 | 115,0 | 812,6 | 2,4702 | 68,98 | 812,6 | 2,4139 | 34,49 | 812,4 | 2,3375 |
| 470 | 349,7 | 817,6 | 2,5981 | 116,6 | 817,6 | 2,4770 | 69,92 | 817,6 | 2,4207 | 34,96 | 817,5 | 2,3443 |
| 480 | 354,4 | 822,7 | 2,6049 | 118,1 | 822,7 | 2,4838 | 70,86 | 822,7 | 2,4275 | 35,43 | 822,6 | 2,3511 |
| 490 | 359,1 | 827,8 | 2,6116 | 119,7 | 827,8 | 2,4905 | 71,80 | 827,8 | 2,4342 | 35,90 | 827,7 | 2,3578 |
| 500 | 363,8 | 832,9 | 2,6182 | 121,3 | 832,9 | 2,4972 | 72,74 | 832,9 | 2,4409 | 36,38 | 832,8 | 2,3645 |
| 510 | 368,5 | 838,0 | 2,6248 | 122,8 | 838,0 | 2,5038 | 73,68 | 838,0 | 2,4475 | 36,85 | 837,9 | 2,3711 |
| 520 | 373,2 | 843,2 | 2,6314 | 124,4 | 843,2 | 2,5103 | 74,62 | 843,2 | 2,4540 | 37,32 | 843,1 | 2,3776 |
| 530 | 377,9 | 848,4 | 2,6379 | 126,0 | 848,4 | 2,5168 | 75,56 | 848,4 | 2,4605 | 37,79 | 848,3 | 2,3841 |
| 540 | 382,6 | 853,6 | 2,6444 | 127,6 | 853,6 | 2,5233 | 76,51 | 853,6 | 2,4670 | 38,26 | 853,5 | 2,3906 |
| 550 | 387,3 | 858,8 | 2,6508 | 129,1 | 858,8 | 2,5297 | 77,45 | 858,8 | 2,4734 | 38,73 | 858,7 | 2,3970 |

Продолжение табл. 41

| t | 0,20 атм | | | 0,40 атм | | | 0,50 атм | | | 1,0 атм | | |
|-----|--|-------|--------|--|-------|--------|--|-------|--------|--|-------|--------|
| | $t' = 59,67$ $v'' = 7,795$ $i'' = 623,1$ $s'' = 1,8903$ | | | $t' = 75,42$ $v'' = 4,069$ $i'' = 629,5$ $s'' = 1,8334$ | | | $t' = 80,86$ $v'' = 3,301$ $i'' = 631,6$ $s'' = 1,8150$ | | | $t' = 99,09$ $v'' = 1,725$ $i'' = 638,5$ $s'' = 1,7587$ | | |
| | v | i | s | v | i | s | v | i | s | v | i | s |
| 0 | 0,0010002 | 0,0 | 0,0000 | 0,0010002 | 0,0 | 0,0000 | 0,0010002 | 0,0 | 0,0000 | 0,0010002 | 0,0 | 0,0000 |
| 10 | 0,0010003 | 10,0 | 0,0361 | 0,0010003 | 10,0 | 0,0361 | 0,0010003 | 10,0 | 0,0361 | 0,0010003 | 10,1 | 0,0361 |
| 20 | 0,0010018 | 20,0 | 0,0708 | 0,0010018 | 20,0 | 0,0708 | 0,0010018 | 20,0 | 0,0708 | 0,0010018 | 20,1 | 0,0708 |
| 30 | 0,0010044 | 30,0 | 0,1042 | 0,0010044 | 30,0 | 0,1042 | 0,0010044 | 30,0 | 0,1042 | 0,0010044 | 30,0 | 0,1042 |
| 40 | 0,0010079 | 40,0 | 0,1365 | 0,0010079 | 40,0 | 0,1365 | 0,0010079 | 40,0 | 0,1365 | 0,0010079 | 40,0 | 0,1365 |
| 50 | 0,0010121 | 50,0 | 0,1679 | 0,0010121 | 50,0 | 0,1680 | 0,0010121 | 50,0 | 0,1680 | 0,0010121 | 50,0 | 0,1680 |
| 60 | 7,797 | 623,7 | 1,8908 | 0,0010171 | 59,9 | 0,1984 | 0,0010171 | 59,9 | 0,1984 | 0,0010170 | 60,0 | 0,1984 |
| 70 | 8,038 | 628,4 | 1,9046 | 0,0010228 | 69,9 | 0,2280 | 0,0010228 | 69,9 | 0,2280 | 0,0010227 | 69,9 | 0,2280 |
| 80 | 8,277 | 633,0 | 1,9178 | 4,123 | 632,0 | 1,8398 | 0,0010290 | 80,0 | 0,2567 | 0,0010289 | 80,0 | 0,2567 |
| 90 | 8,515 | 637,6 | 1,9306 | 4,245 | 636,8 | 1,8532 | 3,390 | 636,4 | 1,8278 | 0,0010359 | 90,0 | 0,2848 |
| 100 | 8,752 | 642,1 | 1,9429 | 4,365 | 641,5 | 1,8658 | 3,457 | 641,2 | 1,8407 | 1,730 | 639,1 | 1,7590 |
| 110 | 8,989 | 646,7 | 1,9549 | 4,485 | 646,0 | 1,8780 | 3,533 | 645,0 | 1,8530 | 1,781 | 644,2 | 1,7730 |
| 120 | 9,226 | 651,2 | 1,9667 | 4,604 | 650,6 | 1,8898 | 3,679 | 650,5 | 1,8648 | 1,830 | 649,1 | 1,7861 |
| 130 | 9,463 | 655,7 | 1,9781 | 4,723 | 655,2 | 1,9013 | 3,775 | 655,0 | 1,8764 | 1,878 | 653,9 | 1,7979 |
| 140 | 9,699 | 660,3 | 1,9892 | 4,842 | 659,8 | 1,9125 | 3,870 | 659,6 | 1,8876 | 1,926 | 658,6 | 1,8093 |
| 150 | 9,935 | 664,9 | 2,0001 | 4,961 | 664,4 | 1,9235 | 3,965 | 664,3 | 1,8986 | 1,975 | 663,2 | 1,8204 |
| 160 | 10,17 | 669,4 | 2,0108 | 5,079 | 669,0 | 1,9342 | 4,063 | 668,8 | 1,9094 | 2,023 | 667,8 | 1,8312 |
| 170 | 10,40 | 674,0 | 2,0213 | 5,198 | 673,6 | 1,9447 | 4,155 | 673,4 | 1,9199 | 2,071 | 672,4 | 1,8418 |
| 180 | 10,64 | 678,6 | 2,0315 | 5,317 | 678,2 | 1,9550 | 4,250 | 678,0 | 1,9302 | 2,119 | 677,1 | 1,8522 |
| 190 | 10,88 | 683,2 | 2,0415 | 5,435 | 682,8 | 1,9650 | 4,345 | 682,6 | 1,9402 | 2,166 | 681,8 | 1,8624 |
| 200 | 11,11 | 687,8 | 2,0513 | 5,553 | 687,4 | 1,9748 | 4,440 | 687,3 | 1,9501 | 2,214 | 686,5 | 1,8724 |
| 210 | 11,35 | 692,4 | 2,0610 | 5,672 | 692,0 | 1,9845 | 4,535 | 691,9 | 1,9598 | 2,262 | 691,2 | 1,8822 |
| 220 | 11,58 | 697,0 | 2,0705 | 5,790 | 696,6 | 1,9940 | 4,629 | 696,5 | 1,9693 | 2,310 | 695,9 | 1,8918 |
| 230 | 11,82 | 701,7 | 2,0798 | 5,908 | 701,3 | 2,0033 | 4,724 | 701,2 | 1,9786 | 2,357 | 700,7 | 1,9013 |
| 240 | 12,06 | 706,3 | 2,0890 | 6,026 | 705,9 | 2,0125 | 4,819 | 705,9 | 1,9878 | 2,405 | 705,4 | 1,9106 |
| 250 | 12,29 | 711,0 | 2,0980 | 6,145 | 710,6 | 2,0215 | 4,913 | 710,5 | 1,9968 | 2,452 | 710,2 | 1,9197 |
| 260 | 12,53 | 715,7 | 2,1068 | 6,263 | 715,3 | 2,0304 | 5,005 | 715,2 | 2,0057 | 2,500 | 714,9 | 1,9287 |
| 270 | 12,76 | 720,3 | 2,1155 | 6,382 | 720,0 | 2,0391 | 5,102 | 719,9 | 2,0144 | 2,547 | 719,6 | 1,9376 |
| 280 | 13,00 | 725,0 | 2,1241 | 6,500 | 724,7 | 2,0477 | 5,197 | 724,6 | 2,0230 | 2,595 | 724,3 | 1,9464 |
| 290 | 13,24 | 729,8 | 2,1326 | 6,618 | 729,4 | 2,0562 | 5,292 | 729,4 | 2,0315 | 2,642 | 729,1 | 1,9550 |
| 300 | 13,47 | 734,5 | 2,1410 | 6,736 | 734,2 | 2,0645 | 5,387 | 734,1 | 2,0398 | 2,690 | 733,8 | 1,9635 |
| 310 | 13,71 | 739,1 | 2,1492 | 6,854 | 739,0 | 2,0727 | 5,482 | 739,0 | 2,0480 | 2,737 | 738,6 | 1,9718 |
| 320 | 13,94 | 743,9 | 2,1573 | 6,971 | 743,8 | 2,0808 | 5,577 | 743,7 | 2,0561 | 2,784 | 743,4 | 1,9800 |
| 330 | 14,17 | 748,7 | 2,1653 | 7,089 | 748,6 | 2,0888 | 5,672 | 748,5 | 2,0641 | 2,832 | 748,2 | 1,9881 |
| 340 | 14,40 | 753,5 | 2,1731 | 7,207 | 753,4 | 2,0967 | 5,767 | 753,3 | 2,0720 | 2,880 | 753,0 | 1,9961 |
| 350 | 14,64 | 758,3 | 2,1809 | 7,325 | 758,2 | 2,1045 | 5,861 | 758,1 | 2,0798 | 2,927 | 757,8 | 2,0039 |
| 360 | 14,87 | 763,1 | 2,1886 | 7,443 | 763,0 | 2,1122 | 5,955 | 763,0 | 2,0875 | 2,975 | 762,6 | 2,0116 |
| 370 | 15,11 | 767,9 | 2,1962 | 7,561 | 767,9 | 2,1198 | 6,050 | 767,8 | 2,0951 | 3,022 | 767,5 | 2,0192 |
| 380 | 15,34 | 772,8 | 2,2037 | 7,679 | 772,7 | 2,1273 | 6,144 | 772,7 | 2,1026 | 3,068 | 772,4 | 2,0268 |
| 390 | 15,58 | 777,7 | 2,2111 | 7,798 | 777,6 | 2,1347 | 6,239 | 777,6 | 2,1100 | 3,115 | 777,3 | 2,0343 |
| 400 | 15,82 | 782,6 | 2,2185 | 7,916 | 782,5 | 2,1421 | 6,333 | 782,5 | 2,1173 | 3,163 | 782,3 | 2,0417 |
| 410 | 16,05 | 787,5 | 2,2257 | 8,033 | 787,4 | 2,1493 | 6,427 | 787,4 | 2,1246 | 3,210 | 787,2 | 2,0490 |
| 420 | 16,29 | 792,4 | 2,2329 | 8,151 | 792,4 | 2,1565 | 6,521 | 792,3 | 2,1318 | 3,257 | 792,2 | 2,0562 |
| 430 | 16,52 | 797,4 | 2,2400 | 8,269 | 797,3 | 2,1636 | 6,615 | 797,3 | 2,1389 | 3,304 | 797,1 | 2,0633 |
| 440 | 16,76 | 802,4 | 2,2470 | 8,387 | 802,3 | 2,1707 | 6,710 | 802,3 | 2,1460 | 3,352 | 802,1 | 2,0703 |
| 450 | 16,99 | 807,4 | 2,2541 | 8,505 | 807,3 | 2,1778 | 6,804 | 807,3 | 2,1530 | 3,399 | 807,1 | 2,0773 |
| 460 | 17,23 | 812,4 | 2,2610 | 8,623 | 812,4 | 2,1847 | 6,898 | 812,3 | 2,1599 | 3,446 | 812,2 | 2,0842 |
| 470 | 17,46 | 817,5 | 2,2679 | 8,740 | 817,4 | 2,1915 | 6,992 | 817,4 | 2,1668 | 3,493 | 817,2 | 2,0910 |
| 480 | 17,70 | 822,5 | 2,2747 | 8,858 | 822,5 | 2,1983 | 7,087 | 822,5 | 2,1736 | 3,540 | 822,3 | 2,0977 |
| 490 | 17,93 | 827,6 | 2,2814 | 8,976 | 827,6 | 2,2050 | 7,181 | 827,6 | 2,1803 | 3,587 | 827,4 | 2,1044 |
| 500 | 18,17 | 832,7 | 2,2880 | 9,093 | 832,7 | 2,2117 | 7,275 | 832,7 | 2,1870 | 3,635 | 832,5 | 2,1110 |
| 510 | 18,41 | 837,9 | 2,2946 | 9,211 | 837,8 | 2,2183 | 7,370 | 837,8 | 2,1936 | 3,682 | 837,7 | 2,1175 |
| 520 | 18,64 | 843,1 | 2,3012 | 9,329 | 843,0 | 2,2249 | 7,464 | 843,5 | 2,2001 | 3,729 | 842,8 | 2,1240 |
| 530 | 18,88 | 848,3 | 2,3077 | 9,447 | 848,2 | 2,2314 | 7,558 | 848,2 | 2,2066 | 3,777 | 848,0 | 2,1304 |
| 540 | 19,11 | 853,5 | 2,3142 | 9,564 | 853,4 | 2,2378 | 7,652 | 853,4 | 2,2131 | 3,824 | 853,2 | 2,1368 |
| 550 | 19,34 | 858,7 | 2,3206 | 9,682 | 858,7 | 2,2442 | 7,746 | 858,7 | 2,2195 | 3,871 | 853,3 | 2,1431 |

Продолжение табл. 41

| t | 2,0 <i>ama</i> | | | 4,0 <i>ama</i> | | | 6,0 <i>ama</i> | | | 8,0 <i>ama</i> | | |
|-----|--|-------|--------|----------------|--|--------|----------------|-------|--|----------------|-------|--------|
| | $t' = 119,62$ $v'' = 0,9016$ $i'' = 645,8$ $s'' = 1,7029$ | v | i | s | $t' = 142,92$ $v'' = 0,4706$ $i'' = 653,4$ $s'' = 1,6474$ | v | i | s | $t' = 158,08$ $v'' = 0,3213$ $i'' = 657,8$ $s'' = 1,6151$ | v | i | s |
| 0 | 0,0010001 | 0,0 | 0,0000 | 0,0010000 | 0,1 | 0,0000 | 0,0009999 | 0,1 | 0,0000 | 0,0009998 | 0,2 | 0,0000 |
| 10 | 0,0010003 | 10,1 | 0,0361 | 0,0010002 | 10,1 | 0,0361 | 0,0010001 | 10,2 | 0,0361 | 0,0010000 | 10,2 | 0,0361 |
| 20 | 0,0010018 | 20,1 | 0,0708 | 0,0010017 | 20,1 | 0,0708 | 0,0010016 | 20,2 | 0,0708 | 0,0010015 | 20,2 | 0,0708 |
| 30 | 0,0010043 | 30,0 | 0,1042 | 0,0010042 | 30,1 | 0,1042 | 0,0010041 | 30,1 | 0,1042 | 0,0010040 | 30,2 | 0,1041 |
| 40 | 0,0010078 | 40,0 | 0,1365 | 0,0010077 | 40,1 | 0,1365 | 0,0010077 | 40,1 | 0,1365 | 0,0010076 | 40,2 | 0,1365 |
| 50 | 0,0010120 | 50,0 | 0,1680 | 0,0010119 | 50,0 | 0,1679 | 0,0010118 | 50,1 | 0,1679 | 0,0010118 | 50,1 | 0,1679 |
| 60 | 0,0010170 | 60,0 | 0,1984 | 0,0010169 | 60,0 | 0,1983 | 0,0010168 | 60,1 | 0,1983 | 0,0010167 | 60,1 | 0,1983 |
| 70 | 0,0010227 | 70,0 | 0,2280 | 0,0010226 | 70,0 | 0,2279 | 0,0010225 | 70,1 | 0,2279 | 0,0010224 | 70,1 | 0,2278 |
| 80 | 0,0010289 | 80,0 | 0,2567 | 0,0010288 | 80,0 | 0,2566 | 0,0010287 | 80,1 | 0,2566 | 0,0010286 | 80,1 | 0,2566 |
| 90 | 0,0010358 | 90,0 | 0,2848 | 0,0010357 | 90,0 | 0,2847 | 0,0010356 | 90,1 | 0,2847 | 0,0010355 | 90,1 | 0,2846 |
| 100 | 0,0010435 | 100,1 | 0,3121 | 0,0010433 | 100,1 | 0,3120 | 0,0010432 | 100,1 | 0,3120 | 0,0010431 | 100,2 | 0,3119 |
| 110 | 0,0010515 | 110,1 | 0,3387 | 0,0010514 | 110,2 | 0,3386 | 0,0010513 | 110,2 | 0,3386 | 0,0010512 | 110,2 | 0,3386 |
| 120 | 0,9027 | 646,1 | 1,7033 | 0,0010602 | 120,3 | 0,3646 | 0,0010601 | 120,3 | 0,3646 | 0,0010600 | 120,3 | 0,3646 |
| 130 | 0,9291 | 651,6 | 1,7169 | 0,0010697 | 130,5 | 0,3901 | 0,0010696 | 130,5 | 0,3900 | 0,0010695 | 130,5 | 0,3900 |
| 140 | 0,9545 | 656,7 | 1,7294 | 0,0010798 | 140,7 | 0,4159 | 0,0010797 | 140,7 | 0,4150 | 0,0010795 | 140,7 | 0,4149 |
| 150 | 0,9795 | 661,6 | 1,7412 | 0,4806 | 657,7 | 1,6575 | 0,0010906 | 150,9 | 0,4395 | 0,0010904 | 151,0 | 0,4394 |
| 160 | 1,003 | 666,4 | 1,7525 | 0,4940 | 663,3 | 1,6704 | 0,3232 | 659,1 | 1,6178 | 0,0011020 | 161,3 | 0,4636 |
| 170 | 1,028 | 671,2 | 1,7634 | 0,5070 | 668,5 | 1,6823 | 0,3326 | 664,9 | 1,6316 | 0,2450 | 661,1 | 1,5926 |
| 180 | 1,052 | 675,9 | 1,7740 | 0,5197 | 673,5 | 1,6935 | 0,3416 | 670,4 | 1,6439 | 0,2524 | 667,2 | 1,6067 |
| 190 | 1,077 | 680,6 | 1,7843 | 0,5323 | 678,4 | 1,7042 | 0,3504 | 675,7 | 1,6553 | 0,2594 | 672,9 | 1,6191 |
| 200 | 1,101 | 685,3 | 1,7944 | 0,5448 | 683,2 | 1,7146 | 0,3591 | 680,8 | 1,6662 | 0,2662 | 678,4 | 1,6307 |
| 210 | 1,125 | 690,0 | 1,8043 | 0,5573 | 688,0 | 1,7247 | 0,3677 | 685,8 | 1,6768 | 0,2729 | 683,7 | 1,6417 |
| 220 | 1,149 | 694,8 | 1,8140 | 0,5697 | 692,8 | 1,7346 | 0,3763 | 690,8 | 1,6871 | 0,2795 | 688,9 | 1,6523 |
| 230 | 1,173 | 699,6 | 1,8235 | 0,5821 | 697,7 | 1,7444 | 0,3848 | 695,8 | 1,6971 | 0,2860 | 694,0 | 1,6626 |
| 240 | 1,197 | 704,4 | 1,8329 | 0,5944 | 702,5 | 1,7540 | 0,3932 | 700,8 | 1,7069 | 0,2925 | 699,1 | 1,6726 |
| 250 | 1,221 | 709,2 | 1,8422 | 0,6067 | 707,4 | 1,7634 | 0,4016 | 705,8 | 1,7165 | 0,2990 | 704,2 | 1,6824 |
| 260 | 1,245 | 714,0 | 1,8513 | 0,6190 | 712,4 | 1,7727 | 0,4099 | 710,7 | 1,7259 | 0,3054 | 709,3 | 1,6920 |
| 270 | 1,269 | 718,8 | 1,8602 | 0,6312 | 717,3 | 1,7818 | 0,4181 | 715,7 | 1,7351 | 0,3117 | 714,4 | 1,7014 |
| 280 | 1,293 | 723,6 | 1,8689 | 0,6433 | 722,2 | 1,7907 | 0,4264 | 720,7 | 1,7441 | 0,3180 | 719,4 | 1,7106 |
| 290 | 1,317 | 728,5 | 1,8775 | 0,6555 | 727,2 | 1,7994 | 0,4346 | 725,7 | 1,7529 | 0,3242 | 724,4 | 1,7196 |
| 300 | 1,341 | 733,4 | 1,8860 | 0,6676 | 732,1 | 1,8080 | 0,4428 | 730,7 | 1,7616 | 0,3305 | 729,4 | 1,7284 |
| 310 | 1,365 | 738,2 | 1,8944 | 0,6796 | 737,0 | 1,8165 | 0,4509 | 735,7 | 1,7702 | 0,3367 | 734,4 | 1,7370 |
| 320 | 1,390 | 743,0 | 1,9027 | 0,6917 | 741,9 | 1,8249 | 0,4591 | 740,7 | 1,7787 | 0,3429 | 739,4 | 1,7455 |
| 330 | 1,413 | 747,9 | 1,9109 | 0,7037 | 746,8 | 1,8331 | 0,4672 | 745,7 | 1,7870 | 0,3490 | 744,5 | 1,7539 |
| 340 | 1,437 | 752,8 | 1,9190 | 0,7158 | 751,8 | 1,8412 | 0,4753 | 750,7 | 1,7952 | 0,3552 | 749,6 | 1,7622 |
| 350 | 1,461 | 757,7 | 1,9269 | 0,7278 | 756,7 | 1,8492 | 0,4834 | 755,7 | 1,8033 | 0,3613 | 754,7 | 1,7704 |
| 360 | 1,485 | 762,6 | 1,9347 | 0,7398 | 761,6 | 1,8571 | 0,4915 | 760,7 | 1,8113 | 0,3674 | 759,8 | 1,7785 |
| 370 | 1,509 | 767,5 | 1,9424 | 0,7518 | 766,6 | 1,8649 | 0,4996 | 765,7 | 1,8191 | 0,3735 | 764,8 | 1,7864 |
| 380 | 1,532 | 772,4 | 1,9500 | 0,7637 | 771,5 | 1,8726 | 0,5077 | 770,7 | 1,8268 | 0,3796 | 769,8 | 1,7942 |
| 390 | 1,556 | 777,3 | 1,9575 | 0,7756 | 776,5 | 1,8802 | 0,5157 | 775,7 | 1,8344 | 0,3857 | 774,8 | 1,8019 |
| 400 | 1,579 | 782,2 | 1,9649 | 0,7875 | 781,4 | 1,8876 | 0,5237 | 780,7 | 1,8419 | 0,3918 | 779,9 | 1,8095 |
| 410 | 1,602 | 787,2 | 1,9722 | 0,7995 | 786,4 | 1,8949 | 0,5318 | 785,7 | 1,8493 | 0,3978 | 785,0 | 1,8169 |
| 420 | 1,626 | 792,1 | 1,9794 | 0,8114 | 791,4 | 1,9021 | 0,5398 | 790,7 | 1,8566 | 0,4039 | 790,1 | 1,8242 |
| 430 | 1,650 | 797,1 | 1,9865 | 0,8233 | 796,4 | 1,9093 | 0,5478 | 795,7 | 1,8638 | 0,4099 | 795,1 | 1,8315 |
| 440 | 1,673 | 802,1 | 1,9936 | 0,8352 | 801,5 | 1,9164 | 0,5558 | 800,8 | 1,8710 | 0,4159 | 800,1 | 1,8387 |
| 450 | 1,697 | 807,1 | 2,0006 | 0,8471 | 806,5 | 1,9234 | 0,5637 | 805,9 | 1,8781 | 0,4219 | 805,2 | 1,8458 |
| 460 | 1,721 | 812,1 | 2,0075 | 0,8590 | 811,6 | 1,9304 | 0,5717 | 811,0 | 1,8851 | 0,4280 | 810,3 | 1,8528 |
| 470 | 1,744 | 817,1 | 2,0143 | 0,8709 | 816,6 | 1,9373 | 0,5797 | 816,1 | 1,8920 | 0,4340 | 815,4 | 1,8597 |
| 480 | 1,768 | 822,2 | 2,0210 | 0,8828 | 821,7 | 1,9441 | 0,5876 | 821,2 | 1,8988 | 0,4400 | 820,5 | 1,8665 |
| 490 | 1,792 | 827,3 | 2,0277 | 0,8947 | 826,8 | 1,9508 | 0,5955 | 826,3 | 1,9055 | 0,4460 | 825,7 | 1,8732 |
| 500 | 1,815 | 832,4 | 2,0343 | 0,9066 | 831,9 | 1,9574 | 0,6036 | 831,4 | 1,9122 | 0,4519 | 830,9 | 1,8799 |
| 510 | 1,839 | 837,5 | 2,0408 | 0,9185 | 836,9 | 1,9640 | 0,6115 | 836,5 | 1,9188 | 0,4579 | 836,0 | 1,8865 |
| 520 | 1,864 | 842,6 | 2,0473 | 0,9304 | 842,0 | 1,9705 | 0,6194 | 841,6 | 1,9253 | 0,4639 | 841,1 | 1,8931 |
| 530 | 1,888 | 847,7 | 2,0537 | 0,9423 | 847,2 | 1,9769 | 0,6273 | 846,7 | 1,9318 | 0,4699 | 846,2 | 1,8996 |
| 540 | 1,911 | 852,9 | 0,0601 | 0,9542 | 852,3 | 1,9833 | 0,6352 | 851,8 | 1,9383 | 0,4759 | 851,4 | 1,9061 |
| 550 | 1,935 | 858,1 | 2,0665 | 0,9660 | 857,6 | 1,9896 | 0,6431 | 857,0 | 1,9447 | 0,4819 | 856,6 | 1,9126 |

Продолжени е табл. 41

| t | 10,0 α та | | | 12,5 α та | | | 15,0 α та | | | 17,5 α та | | |
|-----|--|-------|--------|--|-------|--------|--|-------|--------|--|-------|--------|
| | $t' = 179,04$ $v'' = 0,1981$ $i'' = 663,0$ $s'' = 1,5740$ | | | $t' = 188,92$ $v'' = 0,1600$ $i'' = 665,1$ $s'' = 1,5559$ | | | $t' = 197,36$ $v'' = 0,1343$ $i'' = 666,6$ $s'' = 1,5406$ | | | $t' = 204,76$ $v'' = 0,1157$ $i'' = 667,7$ $s'' = 1,5275$ | | |
| | v | i | s | v | i | s | v | i | s | v | i | s |
| 0 | 0,0009997 | 0,2 | 0,0000 | 0,0009996 | 0,3 | 0,0000 | 0,0009994 | 0,4 | 0,0000 | 0,0009993 | 0,4 | 0,0000 |
| 10 | 0,0009999 | 10,3 | 0,0361 | 0,0009998 | 10,3 | 0,0361 | 0,0009997 | 10,4 | 0,0361 | 0,0009995 | 10,4 | 0,0361 |
| 20 | 0,0010014 | 20,3 | 0,0707 | 0,0010013 | 20,3 | 0,0707 | 0,0010012 | 20,4 | 0,0707 | 0,0010011 | 20,4 | 0,0707 |
| 30 | 0,0010040 | 30,2 | 0,1041 | 0,0010038 | 30,3 | 0,1041 | 0,0010037 | 30,3 | 0,1041 | 0,0010036 | 30,4 | 0,1041 |
| 40 | 0,0010075 | 40,2 | 0,1364 | 0,0010074 | 40,2 | 0,1364 | 0,0010073 | 40,3 | 0,1364 | 0,0010071 | 40,3 | 0,1364 |
| 50 | 0,0010117 | 50,2 | 0,1678 | 0,0010115 | 50,2 | 0,1678 | 0,0010115 | 50,2 | 0,1678 | 0,0010113 | 50,3 | 0,1678 |
| 60 | 0,0010166 | 60,1 | 0,1982 | 0,0010165 | 60,2 | 0,1982 | 0,0010164 | 60,2 | 0,1982 | 0,0010163 | 60,2 | 0,1982 |
| 70 | 0,0010223 | 70,1 | 0,2278 | 0,0010222 | 70,2 | 0,2278 | 0,0010221 | 70,2 | 0,2277 | 0,0010220 | 70,3 | 0,2277 |
| 80 | 0,0010285 | 80,1 | 0,2565 | 0,0010284 | 80,2 | 0,2565 | 0,0010283 | 80,2 | 0,2564 | 0,0010282 | 80,3 | 0,2564 |
| 90 | 0,0010354 | 90,1 | 0,2846 | 0,0010353 | 90,2 | 0,2845 | 0,0010352 | 90,2 | 0,2845 | 0,0010350 | 90,3 | 0,2844 |
| 100 | 0,0010430 | 100,2 | 0,3119 | 0,0010429 | 100,2 | 0,3118 | 0,0010427 | 100,3 | 0,3118 | 0,0010426 | 100,3 | 0,3117 |
| 110 | 0,0010511 | 110,3 | 0,3385 | 0,0010510 | 110,3 | 0,3385 | 0,0010508 | 110,4 | 0,3384 | 0,0010507 | 110,4 | 0,3383 |
| 120 | 0,0010599 | 120,4 | 0,3645 | 0,0010597 | 120,4 | 0,3645 | 0,0010596 | 120,5 | 0,3644 | 0,0010595 | 120,5 | 0,3644 |
| 130 | 0,0010694 | 130,6 | 0,3900 | 0,0010692 | 130,6 | 0,3899 | 0,0010691 | 130,6 | 0,3898 | 0,0010689 | 130,7 | 0,3898 |
| 140 | 0,0010794 | 140,7 | 0,4148 | 0,0010793 | 140,8 | 0,4148 | 0,0010791 | 140,8 | 0,4148 | 0,0010790 | 140,9 | 0,4147 |
| 150 | 0,0010902 | 151,0 | 0,4394 | 0,0010901 | 151,0 | 0,4393 | 0,0010899 | 151,1 | 0,4392 | 0,0010898 | 151,1 | 0,4391 |
| 160 | 0,0011018 | 161,3 | 0,4635 | 0,0011016 | 161,3 | 0,4635 | 0,0011015 | 161,4 | 0,4634 | 0,0011013 | 161,4 | 0,4633 |
| 170 | 0,0011142 | 171,7 | 0,4873 | 0,0011140 | 171,7 | 0,4872 | 0,0011139 | 171,8 | 0,4871 | 0,0011137 | 171,8 | 0,4870 |
| 180 | 0,1987 | 663,6 | 1,5755 | 0,0011273 | 182,2 | 0,5106 | 0,0011271 | 182,2 | 0,5105 | 0,0011269 | 182,3 | 0,5103 |
| 190 | 0,2046 | 669,8 | 1,5844 | 0,1604 | 665,5 | 1,5572 | 0,0011413 | 192,8 | 0,5335 | 0,0011411 | 192,8 | 0,5334 |
| 200 | 0,2103 | 675,6 | 1,6015 | 0,1654 | 672,0 | 1,5711 | 0,1352 | 668,2 | 1,5440 | 0,0011563 | 203,5 | 0,5561 |
| 210 | 0,2159 | 681,2 | 1,6139 | 0,1702 | 678,1 | 1,5836 | 0,1395 | 675,0 | 1,5581 | 0,1175 | 671,0 | 1,5348 |
| 220 | 0,2214 | 686,7 | 1,6241 | 0,1748 | 683,9 | 1,5953 | 0,1436 | 681,2 | 1,5705 | 0,1212 | 677,8 | 1,5485 |
| 230 | 0,2268 | 692,1 | 1,6349 | 0,1793 | 689,5 | 1,6064 | 0,1475 | 687,0 | 1,5822 | 0,1247 | 684,0 | 1,5609 |
| 240 | 0,2321 | 697,4 | 1,6454 | 0,1837 | 695,0 | 1,6171 | 0,1513 | 692,6 | 1,5934 | 0,1281 | 689,9 | 1,5725 |
| 250 | 0,2374 | 702,6 | 1,6556 | 0,1881 | 700,4 | 1,6275 | 0,1550 | 698,1 | 1,6041 | 0,1314 | 695,6 | 1,5835 |
| 260 | 0,2426 | 707,7 | 1,6654 | 0,1924 | 705,7 | 1,6376 | 0,1587 | 703,5 | 1,6144 | 0,1347 | 701,2 | 1,5942 |
| 270 | 0,2477 | 712,8 | 1,6749 | 0,1967 | 710,9 | 1,6474 | 0,1624 | 708,8 | 1,6244 | 0,1379 | 706,7 | 1,6045 |
| 280 | 0,2529 | 717,8 | 1,6841 | 0,2010 | 716,0 | 1,6569 | 0,1660 | 714,1 | 1,6342 | 0,1411 | 712,2 | 1,6145 |
| 290 | 0,2580 | 722,9 | 1,6931 | 0,2052 | 721,1 | 1,6662 | 0,1696 | 719,4 | 1,6437 | 0,1442 | 717,6 | 1,6242 |
| 300 | 0,2630 | 728,0 | 1,7020 | 0,2093 | 726,3 | 1,6753 | 0,1731 | 724,7 | 1,6529 | 0,1473 | 722,9 | 1,6337 |
| 310 | 0,2681 | 733,1 | 1,7108 | 0,2133 | 731,5 | 1,6842 | 0,1766 | 729,9 | 1,6620 | 0,1504 | 723,2 | 1,6438 |
| 320 | 0,2731 | 738,3 | 1,7195 | 0,2173 | 736,7 | 1,6930 | 0,1800 | 735,1 | 1,6710 | 0,1534 | 728,6 | 1,6521 |
| 330 | 0,2780 | 743,4 | 1,7280 | 0,2212 | 741,9 | 1,7016 | 0,1833 | 740,4 | 1,6798 | 0,1563 | 733,9 | 1,6610 |
| 340 | 0,2829 | 748,5 | 1,7364 | 0,2252 | 747,0 | 1,7101 | 0,1867 | 745,7 | 1,6884 | 0,1592 | 744,2 | 1,6697 |
| 350 | 0,2879 | 753,6 | 1,7447 | 0,2292 | 752,2 | 1,7184 | 0,1901 | 751,0 | 1,6969 | 0,1623 | 749,7 | 1,6783 |
| 360 | 0,2929 | 758,7 | 1,7528 | 0,2332 | 757,4 | 1,7266 | 0,1936 | 756,3 | 1,7052 | 0,1652 | 755,0 | 1,6867 |
| 370 | 0,2979 | 763,8 | 1,7608 | 0,2373 | 762,6 | 1,7347 | 0,1970 | 761,5 | 1,7134 | 0,1681 | 760,3 | 1,6949 |
| 380 | 0,3028 | 768,9 | 1,7687 | 0,2413 | 767,8 | 1,7427 | 0,2003 | 766,7 | 1,7215 | 0,1710 | 765,6 | 1,7030 |
| 390 | 0,3077 | 774,0 | 1,7764 | 0,2453 | 772,9 | 1,7506 | 0,2036 | 771,9 | 1,7294 | 0,1739 | 770,9 | 1,7110 |
| 400 | 0,3126 | 779,1 | 1,7840 | 0,2492 | 778,1 | 1,7583 | 0,2070 | 777,1 | 1,7372 | 0,1768 | 776,2 | 1,7189 |
| 410 | 0,3174 | 784,2 | 1,7915 | 0,2531 | 783,2 | 1,7659 | 0,2103 | 782,3 | 1,7448 | 0,1796 | 781,4 | 1,7267 |
| 420 | 0,3223 | 789,3 | 1,7989 | 0,2571 | 788,3 | 1,7733 | 0,2136 | 787,5 | 1,7523 | 0,1825 | 786,6 | 1,7343 |
| 430 | 0,3272 | 794,3 | 1,8062 | 0,2610 | 793,5 | 1,7806 | 0,2169 | 792,7 | 1,7597 | 0,1853 | 791,8 | 1,7415 |
| 440 | 0,3320 | 799,4 | 1,8134 | 0,2649 | 798,6 | 1,7879 | 0,2201 | 797,9 | 1,7670 | 0,1882 | 797,0 | 1,7492 |
| 450 | 0,3369 | 804,6 | 1,8205 | 0,2688 | 803,8 | 1,7951 | 0,2234 | 803,0 | 1,7742 | 0,1910 | 802,2 | 1,7565 |
| 460 | 0,3417 | 809,7 | 1,8275 | 0,2727 | 808,9 | 1,8022 | 0,2267 | 808,1 | 1,7813 | 0,1938 | 807,4 | 1,7636 |
| 470 | 0,3465 | 814,8 | 1,8345 | 0,2766 | 814,0 | 1,8091 | 0,2299 | 813,3 | 1,7883 | 0,1966 | 812,6 | 1,7706 |
| 480 | 0,3513 | 819,9 | 1,8414 | 0,2804 | 819,2 | 1,8160 | 0,2332 | 818,5 | 1,7952 | 0,1995 | 817,8 | 1,7776 |
| 490 | 0,3561 | 825,1 | 1,8482 | 0,2842 | 824,5 | 1,8228 | 0,2365 | 823,8 | 1,8021 | 0,2023 | 823,0 | 1,7845 |
| 500 | 0,3609 | 830,3 | 1,8549 | 0,2881 | 829,7 | 1,8296 | 0,2397 | 829,0 | 1,8089 | 0,2050 | 823,3 | 1,7913 |
| 510 | 0,3658 | 835,5 | 1,8616 | 0,2920 | 834,9 | 1,8363 | 0,2430 | 834,2 | 1,8156 | 0,2078 | 833,6 | 1,7980 |
| 520 | 0,3706 | 840,7 | 1,8682 | 0,2959 | 840,1 | 1,8429 | 0,2462 | 839,4 | 1,8223 | 0,2106 | 833,9 | 1,8047 |
| 530 | 0,3754 | 845,9 | 1,8747 | 0,2998 | 845,4 | 1,8495 | 0,2494 | 844,7 | 1,8289 | 0,2134 | 844,2 | 1,8113 |
| 540 | 0,3802 | 851,1 | 1,8811 | 0,3037 | 850,7 | 1,8560 | 0,2526 | 850,0 | 1,8354 | 0,2162 | 849,5 | 1,8179 |
| 550 | 0,3851 | 856,2 | 1,8875 | 0,3076 | 856,0 | 1,8625 | 0,2559 | 855,4 | 1,8419 | 0,2191 | 854,8 | 1,8245 |

Продолжение табл. 41

| t | 20 атм | | | 25 атм | | | 30 атм | | | 35 атм | | |
|-----|--|-------|--------|---|-------|--------|---|-------|--------|---|-------|--------|
| | $t' = 211,38$ $v'' = 0,1016$ $i'' = 669,5$ $s'' = 1,5160$ | t | s | $t' = 222,90$ $v'' = 0,08157$ $i'' = 669,4$ $s'' = 1,4902$ | t | s | $t' = 232,76$ $v'' = 0,06802$ $i'' = 669,7$ $s'' = 1,4793$ | t | s | $t' = 241,42$ $v'' = 0,05822$ $i'' = 669,5$ $s'' = 1,4645$ | t | s'' |
| 0 | 0,0009992 | 0,5 | 0,0006 | 0,0009989 | 0,5 | 0,0006 | 0,0009987 | 0,7 | 0,0000 | 0,0009984 | 0,8 | 0,0000 |
| 10 | 0,0009994 | 10,5 | 0,0360 | 0,0009992 | 10,6 | 0,0360 | 0,0009990 | 10,7 | 0,0360 | 0,0009987 | 10,8 | 0,0360 |
| 20 | 0,0010010 | 20,5 | 0,0707 | 0,0010007 | 20,6 | 0,0706 | 0,0010005 | 20,7 | 0,0706 | 0,0010003 | 20,8 | 0,0706 |
| 30 | 0,0010035 | 30,4 | 0,1041 | 0,0010033 | 30,5 | 0,1040 | 0,0010031 | 30,6 | 0,1040 | 0,0010029 | 30,7 | 0,1040 |
| 40 | 0,0010070 | 40,4 | 0,1364 | 0,0010068 | 40,5 | 0,1363 | 0,0010066 | 40,6 | 0,1362 | 0,0010064 | 40,7 | 0,1362 |
| 50 | 0,0010112 | 50,4 | 0,1677 | 0,0010110 | 50,4 | 0,1677 | 0,0010108 | 50,6 | 0,1676 | 0,0010106 | 50,7 | 0,1676 |
| 60 | 0,0010161 | 60,3 | 0,1981 | 0,0010159 | 60,4 | 0,1980 | 0,0010157 | 60,5 | 0,1980 | 0,0010155 | 60,6 | 0,1979 |
| 70 | 0,0010218 | 70,3 | 0,2276 | 0,0010216 | 70,4 | 0,2275 | 0,0010213 | 70,5 | 0,2275 | 0,0010211 | 70,6 | 0,2274 |
| 80 | 0,0010280 | 80,3 | 0,2563 | 0,0010278 | 80,4 | 0,2562 | 0,0010275 | 80,5 | 0,2561 | 0,0010273 | 80,6 | 0,2561 |
| 90 | 0,0010349 | 90,3 | 0,2844 | 0,0010347 | 90,4 | 0,2843 | 0,0010344 | 90,5 | 0,2842 | 0,0010342 | 90,6 | 0,2841 |
| 100 | 0,0010425 | 100,4 | 0,3117 | 0,0010422 | 100,5 | 0,3116 | 0,0010419 | 100,5 | 0,3115 | 0,0010417 | 100,6 | 0,3114 |
| 110 | 0,0010506 | 110,4 | 0,3383 | 0,0010503 | 110,5 | 0,3382 | 0,0010501 | 110,6 | 0,3381 | 0,0010498 | 110,7 | 0,3380 |
| 120 | 0,0010593 | 120,5 | 0,3643 | 0,0010591 | 120,6 | 0,3642 | 0,0010588 | 120,7 | 0,3641 | 0,0010585 | 120,8 | 0,3640 |
| 130 | 0,0010683 | 130,7 | 0,3897 | 0,0010680 | 130,8 | 0,3896 | 0,0010678 | 130,9 | 0,3896 | 0,0010675 | 131,0 | 0,3894 |
| 140 | 0,0010783 | 140,9 | 0,4146 | 0,0010780 | 141,0 | 0,4145 | 0,0010778 | 141,1 | 0,4144 | 0,0010775 | 141,2 | 0,4143 |
| 150 | 0,0010896 | 151,1 | 0,4391 | 0,0010893 | 151,2 | 0,4390 | 0,0010890 | 151,3 | 0,4388 | 0,0010886 | 151,4 | 0,4387 |
| 160 | 0,0011011 | 161,4 | 0,4632 | 0,0011008 | 161,5 | 0,4630 | 0,0011004 | 161,6 | 0,4629 | 0,0011001 | 161,7 | 0,4627 |
| 170 | 0,0011135 | 171,8 | 0,4869 | 0,0011131 | 171,9 | 0,4867 | 0,0011127 | 171,9 | 0,4865 | 0,0011124 | 172,0 | 0,4863 |
| 180 | 0,0011267 | 182,3 | 0,5102 | 0,0011263 | 182,3 | 0,5100 | 0,0011259 | 182,4 | 0,5098 | 0,0011255 | 182,5 | 0,5096 |
| 190 | 0,0011409 | 192,9 | 0,5333 | 0,0011404 | 192,9 | 0,5330 | 0,0011399 | 193,0 | 0,5328 | 0,0011395 | 193,1 | 0,5326 |
| 200 | 0,0011561 | 203,5 | 0,5560 | 0,0011556 | 203,6 | 0,5558 | 0,0011552 | 203,6 | 0,5556 | 0,0011547 | 203,7 | 0,5555 |
| 210 | 0,0011726 | 214,3 | 0,5788 | 0,0011720 | 214,4 | 0,5785 | 0,0011715 | 214,4 | 0,5782 | 0,0011710 | 214,5 | 0,5780 |
| 220 | 0,0011899 | 225,3 | 0,6009 | 0,0011893 | 225,3 | 0,6006 | 0,0011889 | 225,3 | 0,6006 | 0,0011886 | 225,4 | 0,6004 |
| 230 | 0,0012086 | 236,4 | 0,6227 | 0,0012080 | 236,4 | 0,6224 | 0,0012075 | 236,4 | 0,6222 | 0,0012070 | 236,5 | 0,6220 |
| 240 | 0,0012290 | 247,7 | 0,6446 | 0,0012284 | 247,7 | 0,6443 | 0,0012279 | 247,7 | 0,6441 | 0,0012274 | 247,8 | 0,6440 |
| 250 | 0,0012500 | 259,2 | 0,6663 | 0,0012494 | 259,2 | 0,6660 | 0,0012489 | 259,2 | 0,6658 | 0,0012484 | 259,3 | 0,6656 |
| 260 | 0,0012715 | 270,8 | 0,6878 | 0,0012709 | 270,8 | 0,6875 | 0,0012704 | 270,8 | 0,6873 | 0,0012699 | 270,9 | 0,6871 |
| 270 | 0,0012935 | 282,5 | 0,7091 | 0,0012929 | 282,5 | 0,7088 | 0,0012924 | 282,5 | 0,7086 | 0,0012919 | 282,6 | 0,7084 |
| 280 | 0,0013160 | 294,3 | 0,7302 | 0,0013154 | 294,3 | 0,7299 | 0,0013149 | 294,3 | 0,7297 | 0,0013144 | 294,4 | 0,7295 |
| 290 | 0,0013390 | 306,2 | 0,7511 | 0,0013384 | 306,2 | 0,7508 | 0,0013379 | 306,2 | 0,7506 | 0,0013374 | 306,3 | 0,7504 |
| 300 | 0,0013625 | 318,2 | 0,7718 | 0,0013619 | 318,2 | 0,7715 | 0,0013614 | 318,2 | 0,7713 | 0,0013609 | 318,3 | 0,7711 |
| 310 | 0,0013865 | 330,3 | 0,7923 | 0,0013859 | 330,3 | 0,7920 | 0,0013854 | 330,3 | 0,7918 | 0,0013849 | 330,4 | 0,7916 |
| 320 | 0,0014110 | 342,5 | 0,8126 | 0,0014104 | 342,5 | 0,8123 | 0,0014099 | 342,5 | 0,8121 | 0,0014094 | 342,6 | 0,8119 |
| 330 | 0,0014360 | 354,8 | 0,8327 | 0,0014354 | 354,8 | 0,8324 | 0,0014349 | 354,8 | 0,8322 | 0,0014344 | 354,9 | 0,8320 |
| 340 | 0,0014615 | 367,2 | 0,8526 | 0,0014609 | 367,2 | 0,8523 | 0,0014604 | 367,2 | 0,8521 | 0,0014599 | 367,3 | 0,8519 |
| 350 | 0,0014875 | 379,7 | 0,8723 | 0,0014869 | 379,7 | 0,8720 | 0,0014864 | 379,7 | 0,8718 | 0,0014859 | 379,8 | 0,8716 |
| 360 | 0,0015140 | 392,3 | 0,8918 | 0,0015134 | 392,3 | 0,8915 | 0,0015129 | 392,3 | 0,8913 | 0,0015124 | 392,4 | 0,8911 |
| 370 | 0,0015410 | 405,0 | 0,9111 | 0,0015404 | 405,0 | 0,9108 | 0,0015399 | 405,0 | 0,9106 | 0,0015394 | 405,1 | 0,9104 |
| 380 | 0,0015685 | 417,8 | 0,9302 | 0,0015679 | 417,8 | 0,9299 | 0,0015674 | 417,8 | 0,9297 | 0,0015669 | 417,9 | 0,9295 |
| 390 | 0,0015965 | 430,7 | 0,9491 | 0,0015959 | 430,7 | 0,9488 | 0,0015954 | 430,7 | 0,9486 | 0,0015949 | 430,8 | 0,9484 |
| 400 | 0,0016250 | 443,7 | 0,9678 | 0,0016244 | 443,7 | 0,9675 | 0,0016239 | 443,7 | 0,9673 | 0,0016234 | 443,8 | 0,9671 |
| 410 | 0,0016540 | 456,8 | 0,9863 | 0,0016534 | 456,8 | 0,9860 | 0,0016529 | 456,8 | 0,9858 | 0,0016524 | 456,9 | 0,9856 |
| 420 | 0,0016835 | 469,9 | 1,0046 | 0,0016829 | 469,9 | 1,0043 | 0,0016824 | 469,9 | 1,0041 | 0,0016819 | 470,0 | 1,0039 |
| 430 | 0,0017135 | 483,1 | 1,0227 | 0,0017129 | 483,1 | 1,0224 | 0,0017124 | 483,1 | 1,0222 | 0,0017119 | 483,2 | 1,0220 |
| 440 | 0,0017440 | 496,4 | 1,0406 | 0,0017434 | 496,4 | 1,0403 | 0,0017429 | 496,4 | 1,0401 | 0,0017424 | 496,5 | 1,0399 |
| 450 | 0,0017750 | 509,8 | 1,0583 | 0,0017744 | 509,8 | 1,0580 | 0,0017739 | 509,8 | 1,0578 | 0,0017734 | 509,9 | 1,0576 |
| 460 | 0,0018065 | 523,3 | 1,0758 | 0,0018059 | 523,3 | 1,0755 | 0,0018054 | 523,3 | 1,0753 | 0,0018049 | 523,4 | 1,0751 |
| 470 | 0,0018385 | 536,9 | 1,0931 | 0,0018379 | 536,9 | 1,0928 | 0,0018374 | 536,9 | 1,0926 | 0,0018369 | 537,0 | 1,0924 |
| 480 | 0,0018710 | 550,6 | 1,1102 | 0,0018704 | 550,6 | 1,1100 | 0,0018699 | 550,6 | 1,1098 | 0,0018694 | 550,7 | 1,1096 |
| 490 | 0,0019040 | 564,4 | 1,1271 | 0,0019034 | 564,4 | 1,1268 | 0,0019029 | 564,4 | 1,1266 | 0,0019024 | 564,5 | 1,1264 |
| 500 | 0,0019375 | 578,3 | 1,1438 | 0,0019369 | 578,3 | 1,1435 | 0,0019364 | 578,3 | 1,1433 | 0,0019359 | 578,4 | 1,1431 |
| 510 | 0,0019715 | 592,3 | 1,1603 | 0,0019709 | 592,3 | 1,1600 | 0,0019704 | 592,3 | 1,1598 | 0,0019699 | 592,4 | 1,1596 |
| 520 | 0,0020060 | 606,4 | 1,1766 | 0,0020054 | 606,4 | 1,1763 | 0,0020049 | 606,4 | 1,1761 | 0,0020044 | 606,5 | 1,1759 |
| 530 | 0,0020410 | 620,6 | 1,1927 | 0,0020404 | 620,6 | 1,1924 | 0,0020399 | 620,6 | 1,1922 | 0,0020394 | 620,7 | 1,1920 |
| 540 | 0,0020765 | 634,9 | 1,2086 | 0,0020759 | 634,9 | 1,2083 | 0,0020754 | 634,9 | 1,2081 | 0,0020749 | 635,0 | 1,2079 |
| 550 | 0,0021125 | 649,3 | 1,2243 | 0,0021119 | 649,3 | 1,2240 | 0,0021114 | 649,3 | 1,2238 | 0,0021109 | 649,4 | 1,2236 |

Продолжение табл. 41

Продолжение табл. 1

| t | 40 ага | | | 45 ага | | | 50 ага | | | 60 ага | | | | | | |
|-----|---|-------|--------|-----------|---|--------|-----------|-------|--|-----------|-------|--------|---|-------|--------|-----------|
| | $t' = 249,18$ $v'' = 0,05078$ $i'' = 669,0$ $s'' = 1,4513$ | v | i | s | $t' = 256,23$ $v'' = 0,04495$ $i'' = 668,2$ $s'' = 1,4392$ | v | i | s | $t' = 262,7$ $v'' = 0,04024$ $i'' = 667,3$ $s'' = 1,4280$ | v | i | s | $t' = 274,29$ $v'' = 0,03310$ $i'' = 665,0$ $s'' = 1,4078$ | v | i | s |
| 0 | 0,0009982 | 1,0 | 0,0001 | 0,0009979 | 1,1 | 0,0001 | 0,0009977 | 1,2 | 0,0001 | 0,0009972 | 1,4 | 0,0001 | 0,0009976 | 11,4 | 0,0359 | 0,0009976 |
| 10 | 0,0009985 | 10,9 | 0,0360 | 0,0009983 | 11,1 | 0,0359 | 0,0009981 | 11,2 | 0,0359 | 0,0009981 | 11,2 | 0,0359 | 0,0009981 | 21,1 | 0,0705 | 0,0009977 |
| 20 | 0,0010001 | 20,9 | 0,0705 | 0,0009998 | 21,0 | 0,0705 | 0,0009997 | 21,1 | 0,0705 | 0,0009992 | 21,3 | 0,0704 | 0,0009992 | 31,1 | 0,1039 | 0,0009992 |
| 30 | 0,0010027 | 30,9 | 0,1039 | 0,0010024 | 31,0 | 0,1039 | 0,0010022 | 31,1 | 0,1039 | 0,0010018 | 31,3 | 0,1038 | 0,0010018 | 41,0 | 0,1361 | 0,0010018 |
| 40 | 0,0010062 | 40,8 | 0,1362 | 0,0010060 | 40,9 | 0,1361 | 0,0010057 | 41,0 | 0,1361 | 0,0010053 | 41,2 | 0,1360 | 0,0010053 | 51,0 | 0,1674 | 0,0010053 |
| 50 | 0,0010103 | 50,8 | 0,1675 | 0,0010101 | 50,9 | 0,1674 | 0,0010099 | 51,0 | 0,1674 | 0,0010095 | 51,2 | 0,1672 | 0,0010095 | 60,9 | 0,1977 | 0,0010095 |
| 60 | 0,0010152 | 60,7 | 0,1978 | 0,0010150 | 60,8 | 0,1978 | 0,0010148 | 60,9 | 0,1977 | 0,0010144 | 61,1 | 0,1976 | 0,0010144 | 70,9 | 0,2271 | 0,0010144 |
| 70 | 0,0010208 | 70,7 | 0,2273 | 0,0010206 | 70,8 | 0,2272 | 0,0010204 | 70,9 | 0,2271 | 0,0010200 | 71,1 | 0,2270 | 0,0010200 | 80,9 | 0,2558 | 0,0010200 |
| 80 | 0,0010271 | 80,7 | 0,2560 | 0,0010269 | 80,8 | 0,2559 | 0,0010266 | 80,9 | 0,2558 | 0,0010262 | 81,1 | 0,2556 | 0,0010262 | 90,9 | 0,2838 | 0,0010262 |
| 90 | 0,0010339 | 90,7 | 0,2843 | 0,0010337 | 90,8 | 0,2839 | 0,0010334 | 90,9 | 0,2838 | 0,0010330 | 91,1 | 0,2836 | 0,0010330 | 100,9 | 0,3111 | 0,0010330 |
| 100 | 0,0010414 | 100,7 | 0,3113 | 0,0010412 | 100,8 | 0,3112 | 0,0010409 | 100,9 | 0,3111 | 0,0010405 | 101,1 | 0,3109 | 0,0010405 | 110,9 | 0,3377 | 0,0010405 |
| 110 | 0,0010495 | 110,8 | 0,3379 | 0,0010493 | 110,9 | 0,3378 | 0,0010490 | 111,0 | 0,3377 | 0,0010486 | 111,2 | 0,3375 | 0,0010486 | 120,9 | 0,3637 | 0,0010486 |
| 120 | 0,0010582 | 120,9 | 0,3639 | 0,0010580 | 121,0 | 0,3638 | 0,0010577 | 121,1 | 0,3637 | 0,0010573 | 121,3 | 0,3635 | 0,0010573 | 130,9 | 0,3891 | 0,0010573 |
| 130 | 0,0010676 | 131,0 | 0,3893 | 0,0010673 | 131,1 | 0,3892 | 0,0010670 | 131,2 | 0,3891 | 0,0010666 | 131,4 | 0,3889 | 0,0010666 | 140,9 | 0,4141 | 0,0010666 |
| 140 | 0,0010776 | 141,2 | 0,4142 | 0,0010773 | 141,3 | 0,4141 | 0,0010770 | 141,4 | 0,4140 | 0,0010766 | 141,6 | 0,4137 | 0,0010766 | 150,9 | 0,4386 | 0,0010766 |
| 150 | 0,0010883 | 151,4 | 0,4386 | 0,0010880 | 151,5 | 0,4384 | 0,0010877 | 151,6 | 0,4383 | 0,0010873 | 151,8 | 0,4381 | 0,0010873 | 160,9 | 0,4625 | 0,0010873 |
| 160 | 0,0010997 | 161,7 | 0,4625 | 0,0010994 | 161,8 | 0,4624 | 0,0010990 | 161,9 | 0,4622 | 0,0010986 | 162,1 | 0,4619 | 0,0010986 | 170,9 | 0,4861 | 0,0010986 |
| 170 | 0,0011120 | 172,1 | 0,4861 | 0,0011116 | 172,1 | 0,4859 | 0,0011113 | 172,2 | 0,4857 | 0,0011109 | 172,4 | 0,4854 | 0,0011109 | 180,9 | 0,5094 | 0,0011109 |
| 180 | 0,0011251 | 182,5 | 0,5094 | 0,0011247 | 182,6 | 0,5092 | 0,0011243 | 182,7 | 0,5090 | 0,0011239 | 182,9 | 0,5086 | 0,0011239 | 190,9 | 0,5324 | 0,0011239 |
| 190 | 0,0011391 | 193,1 | 0,5324 | 0,0011387 | 193,1 | 0,5322 | 0,0011382 | 193,2 | 0,5320 | 0,0011378 | 193,3 | 0,5316 | 0,0011378 | 200,9 | 0,5551 | 0,0011378 |
| 200 | 0,0011542 | 203,7 | 0,5551 | 0,0011537 | 203,8 | 0,5549 | 0,0011532 | 203,8 | 0,5547 | 0,0011528 | 203,9 | 0,5543 | 0,0011528 | 210,9 | 0,5777 | 0,0011528 |
| 210 | 0,0011704 | 214,5 | 0,5777 | 0,0011699 | 214,5 | 0,5775 | 0,0011694 | 214,6 | 0,5773 | 0,0011690 | 214,7 | 0,5768 | 0,0011690 | 220,9 | 0,5999 | 0,0011690 |
| 220 | 0,0011880 | 225,4 | 0,6001 | 0,0011874 | 225,4 | 0,5999 | 0,0011868 | 225,5 | 0,5996 | 0,0011864 | 225,6 | 0,5991 | 0,0011864 | 230,9 | 0,6222 | 0,0011864 |
| 230 | 0,0012072 | 236,4 | 0,6222 | 0,0012065 | 236,5 | 0,6220 | 0,0012058 | 236,5 | 0,6217 | 0,0012054 | 236,6 | 0,6212 | 0,0012054 | 240,9 | 0,6442 | 0,0012054 |
| 240 | 0,0012282 | 247,7 | 0,6445 | 0,0012274 | 247,8 | 0,6442 | 0,0012266 | 247,8 | 0,6439 | 0,0012262 | 247,8 | 0,6433 | 0,0012262 | 250,9 | 0,6661 | 0,0012262 |
| 250 | 0,0012504 | 259,2 | 0,6664 | 0,0012504 | 259,2 | 0,6664 | 0,0012495 | 259,2 | 0,6661 | 0,0012491 | 259,2 | 0,6655 | 0,0012491 | 260,9 | 0,6885 | 0,0012491 |
| 260 | 0,0012751 | 271,0 | 0,6885 | 0,0012751 | 271,0 | 0,6885 | 0,0012741 | 271,0 | 0,6882 | 0,0012737 | 271,0 | 0,6876 | 0,0012737 | 272,9 | 0,7100 | 0,0012737 |
| 270 | 0,0013014 | 283,0 | 0,7100 | 0,0013014 | 283,0 | 0,7100 | 0,0013004 | 283,0 | 0,7097 | 0,0013000 | 283,0 | 0,7091 | 0,0013000 | 284,9 | 0,7313 | 0,0013000 |
| 280 | 0,0013282 | 295,4 | 0,7313 | 0,0013282 | 295,4 | 0,7313 | 0,0013272 | 295,4 | 0,7310 | 0,0013268 | 295,4 | 0,7304 | 0,0013268 | 296,9 | 0,7525 | 0,0013268 |
| 290 | 0,0013554 | 308,0 | 0,7525 | 0,0013554 | 308,0 | 0,7525 | 0,0013544 | 308,0 | 0,7522 | 0,0013540 | 308,0 | 0,7516 | 0,0013540 | 309,9 | 0,7735 | 0,0013540 |
| 300 | 0,0013830 | 320,9 | 0,7735 | 0,0013830 | 320,9 | 0,7735 | 0,0013820 | 320,9 | 0,7732 | 0,0013816 | 320,9 | 0,7726 | 0,0013816 | 321,9 | 0,7943 | 0,0013816 |
| 310 | 0,0014109 | 333,9 | 0,7943 | 0,0014109 | 333,9 | 0,7943 | 0,0014100 | 333,9 | 0,7940 | 0,0014096 | 333,9 | 0,7934 | 0,0014096 | 334,9 | 0,8150 | 0,0014096 |
| 320 | 0,0014391 | 347,0 | 0,8150 | 0,0014391 | 347,0 | 0,8150 | 0,0014382 | 347,0 | 0,8147 | 0,0014378 | 347,0 | 0,8141 | 0,0014378 | 348,9 | 0,8355 | 0,0014378 |
| 330 | 0,0014676 | 360,2 | 0,8355 | 0,0014676 | 360,2 | 0,8355 | 0,0014667 | 360,2 | 0,8352 | 0,0014663 | 360,2 | 0,8346 | 0,0014663 | 361,9 | 0,8558 | 0,0014663 |
| 340 | 0,0014963 | 373,6 | 0,8558 | 0,0014963 | 373,6 | 0,8558 | 0,0014954 | 373,6 | 0,8555 | 0,0014950 | 373,6 | 0,8549 | 0,0014950 | 374,9 | 0,8759 | 0,0014950 |
| 350 | 0,0015252 | 387,1 | 0,8759 | 0,0015252 | 387,1 | 0,8759 | 0,0015243 | 387,1 | 0,8756 | 0,0015239 | 387,1 | 0,8750 | 0,0015239 | 388,9 | 0,8967 | 0,0015239 |
| 360 | 0,0015543 | 400,7 | 0,8967 | 0,0015543 | 400,7 | 0,8967 | 0,0015534 | 400,7 | 0,8964 | 0,0015530 | 400,7 | 0,8958 | 0,0015530 | 401,9 | 0,9172 | 0,0015530 |
| 370 | 0,0015835 | 414,4 | 0,9172 | 0,0015835 | 414,4 | 0,9172 | 0,0015826 | 414,4 | 0,9169 | 0,0015822 | 414,4 | 0,9163 | 0,0015822 | 415,9 | 0,9375 | 0,0015822 |
| 380 | 0,0016129 | 428,2 | 0,9375 | 0,0016129 | 428,2 | 0,9375 | 0,0016120 | 428,2 | 0,9372 | 0,0016116 | 428,2 | 0,9366 | 0,0016116 | 429,9 | 0,9576 | 0,0016116 |
| 390 | 0,0016424 | 442,1 | 0,9576 | 0,0016424 | 442,1 | 0,9576 | 0,0016415 | 442,1 | 0,9573 | 0,0016411 | 442,1 | 0,9567 | 0,0016411 | 443,9 | 0,9774 | 0,0016411 |
| 400 | 0,0016720 | 456,1 | 0,9774 | 0,0016720 | 456,1 | 0,9774 | 0,0016711 | 456,1 | 0,9771 | 0,0016707 | 456,1 | 0,9765 | 0,0016707 | 457,9 | 0,9970 | 0,0016707 |
| 410 | 0,0017017 | 470,2 | 0,9970 | 0,0017017 | 470,2 | 0,9970 | 0,0017008 | 470,2 | 0,9967 | 0,0017004 | 470,2 | 0,9961 | 0,0017004 | 471,9 | 1,0172 | 0,0017004 |
| 420 | 0,0017315 | 484,4 | 1,0172 | 0,0017315 | 484,4 | 1,0172 | 0,0017306 | 484,4 | 0,9964 | 0,0017302 | 484,4 | 0,9958 | 0,0017302 | 485,9 | 1,0372 | 0,0017302 |
| 430 | 0,0017614 | 498,7 | 1,0372 | 0,0017614 | 498,7 | 1,0372 | 0,0017605 | 498,7 | 0,9955 | 0,0017601 | 498,7 | 0,9949 | 0,0017601 | 499,9 | 1,0579 | 0,0017601 |
| 440 | 0,0017914 | 513,1 | 1,0579 | 0,0017914 | 513,1 | 1,0579 | 0,0017905 | 513,1 | 0,9952 | 0,0017901 | 513,1 | 0,9946 | 0,0017901 | 514,9 | 1,0782 | 0,0017901 |
| 450 | 0,0018215 | 527,6 | 1,0782 | 0,0018215 | 527,6 | 1,0782 | 0,0018206 | 527,6 | 0,9949 | 0,0018202 | 527,6 | 0,9943 | 0,0018202 | 528,9 | 1,0982 | 0,0018202 |
| 460 | 0,0018517 | 542,2 | 1,0982 | 0,0018517 | 542,2 | 1,0982 | 0,0018508 | 542,2 | 0,9946 | 0,0018504 | 542,2 | 0,9940 | 0,0018504 | 543,9 | 1,1189 | 0,0018504 |
| 470 | 0,0018820 | 556,9 | 1,1189 | 0,0018820 | 556,9 | 1,1189 | 0,0018811 | 556,9 | 0,9943 | 0,0018807 | 556,9 | 0,9937 | 0,0018807 | 557,9 | 1,1392 | 0,0018807 |
| 480 | 0,0019124 | 571,7 | 1,1392 | 0,0019124 | 571,7 | 1,1392 | 0,0019115 | 571,7 | 0,9940 | 0,0019111 | 571,7 | 0,9934 | 0,0019111 | 572,9 | 1,1596 | 0,0019111 |
| 490 | 0,0019429 | 586,6 | 1,1596 | 0,0019429 | 586,6 | 1,1596 | 0,0019420 | 586,6 | 0,9937 | 0,0019416 | 586,6 | 0,9931 | 0,0019416 | 587,9 | 1,1799 | 0,0019416 |
| 500 | 0,0019734 | 601,6 | 1,1799 | 0,0019734 | 601,6 | 1,1799 | 0,0019725 | 601,6 | 0,9934 | 0,0019721 | 601,6 | 0,9928 | 0,0019721 | 602,9 | 1,1999 | 0,0019721 |
| 510 | 0,0020040 | 616,7 | 1,1999 | 0,0020040 | 616,7 | 1,1999 | 0,0020031 | 616,7 | 0,9931 | 0,0020027 | 616,7 | 0,9925 | 0,0020027 | 617,9 | 1,2206 | 0,0020027 |
| 520 | 0,0020347 | 631,9 | 1,2206 | 0,0020347 | 631,9 | 1,2206 | 0,0020338 | 631,9 | 0,9928 | 0,0020334 | 631,9 | 0,9922 | 0,0020334 | 632,9 | 1,2409 | 0,0020334 |
| 530 | 0,0020654 | 647,2 | 1,2409 | 0,0020654 | 647,2 | | | | | | | | | | | |

Продолжение табл. 41

| t | 70 ата | | | 80 ата | | | 90 ата | | | 100 ата | | |
|-----|--|-------|--------|---|-------|--------|---|-------|--------|---|-------|--------|
| | $t' = 284,43$ $v'' = 0,02795$ $i'' = 669,1$ $s'' = 1,897$ | i | s | $t' = 293,62$ $v'' = 0,02404$ $i'' = 658,9$ $s'' = 1,3731$ | i | s | $t' = 301,92$ $v'' = 0,02096$ $i'' = 655,1$ $s'' = 1,3576$ | i | s | $t' = 309,53$ $v'' = 0,01845$ $i'' = 651,1$ $s'' = 1,3424$ | i | s |
| 9 | 0,000967 | 1,7 | 0,0001 | 0,000962 | 1,9 | 0,0001 | 0,000957 | 2,2 | 0,0001 | 0,000952 | 2,4 | 0,0001 |
| 10 | 0,000972 | 11,6 | 0,0358 | 0,000967 | 11,9 | 0,0358 | 0,000962 | 12,1 | 0,0358 | 0,000958 | 12,3 | 0,0358 |
| 20 | 0,000988 | 21,6 | 0,0704 | 0,000983 | 21,8 | 0,0703 | 0,000979 | 22,0 | 0,0702 | 0,000975 | 22,2 | 0,0702 |
| 30 | 0,001004 | 31,5 | 0,1037 | 0,001000 | 31,7 | 0,1036 | 0,001000 | 31,9 | 0,1036 | 0,001001 | 32,1 | 0,1035 |
| 40 | 0,0010049 | 41,4 | 0,1359 | 0,0010045 | 41,6 | 0,1359 | 0,0010040 | 41,8 | 0,1357 | 0,0010036 | 42,1 | 0,1356 |
| 50 | 0,0010090 | 51,4 | 0,1671 | 0,0010086 | 51,6 | 0,1670 | 0,0010082 | 51,8 | 0,1663 | 0,0010077 | 52,0 | 0,1667 |
| 60 | 0,0010139 | 61,3 | 0,1974 | 0,0010135 | 61,5 | 0,1973 | 0,0010130 | 61,7 | 0,1971 | 0,0010126 | 61,9 | 0,1970 |
| 70 | 0,0010195 | 71,3 | 0,2268 | 0,0010190 | 71,5 | 0,2267 | 0,0010186 | 71,7 | 0,2265 | 0,0010181 | 71,8 | 0,2264 |
| 80 | 0,0010257 | 81,2 | 0,2555 | 0,0010252 | 81,4 | 0,2553 | 0,0010248 | 81,6 | 0,2551 | 0,0010243 | 81,8 | 0,2550 |
| 90 | 0,0010325 | 91,2 | 0,2834 | 0,0010320 | 91,4 | 0,2832 | 0,0010315 | 91,6 | 0,2831 | 0,0010311 | 91,8 | 0,2829 |
| 100 | 0,0010399 | 101,3 | 0,3107 | 0,0010394 | 101,4 | 0,3105 | 0,0010389 | 101,6 | 0,3103 | 0,0010384 | 101,8 | 0,3101 |
| 110 | 0,0010481 | 111,3 | 0,3373 | 0,0010475 | 111,5 | 0,3371 | 0,0010470 | 111,7 | 0,3369 | 0,0010464 | 111,8 | 0,3367 |
| 120 | 0,0010566 | 121,4 | 0,3633 | 0,0010561 | 121,6 | 0,3631 | 0,0010556 | 121,7 | 0,3628 | 0,0010550 | 121,9 | 0,3626 |
| 130 | 0,0010659 | 131,5 | 0,3887 | 0,0010653 | 131,7 | 0,3884 | 0,0010648 | 131,8 | 0,3882 | 0,0010642 | 132,0 | 0,3880 |
| 140 | 0,0010758 | 141,7 | 0,4135 | 0,0010752 | 141,8 | 0,4133 | 0,0010746 | 142,0 | 0,4130 | 0,0010740 | 142,1 | 0,4128 |
| 150 | 0,0010861 | 151,9 | 0,4378 | 0,0010858 | 152,0 | 0,4376 | 0,0010851 | 152,2 | 0,4373 | 0,0010845 | 152,3 | 0,4371 |
| 160 | 0,0010977 | 162,1 | 0,4617 | 0,0010970 | 162,2 | 0,4614 | 0,0010963 | 162,4 | 0,4611 | 0,0010957 | 162,5 | 0,4608 |
| 170 | 0,0011093 | 172,4 | 0,4851 | 0,0010991 | 172,6 | 0,4848 | 0,0011083 | 172,7 | 0,4844 | 0,0011076 | 172,8 | 0,4841 |
| 180 | 0,0011226 | 182,9 | 0,5082 | 0,0011219 | 183,0 | 0,5079 | 0,0011211 | 183,1 | 0,5075 | 0,0011203 | 183,2 | 0,5072 |
| 190 | 0,0011365 | 193,4 | 0,5312 | 0,0011356 | 193,5 | 0,5308 | 0,0011348 | 193,6 | 0,5305 | 0,0011339 | 193,7 | 0,5301 |
| 200 | 0,0011513 | 204,0 | 0,5539 | 0,0011504 | 204,1 | 0,5535 | 0,0011494 | 204,2 | 0,5532 | 0,0011485 | 204,3 | 0,5527 |
| 210 | 0,0011673 | 214,7 | 0,5764 | 0,0011662 | 214,8 | 0,5759 | 0,0011652 | 214,9 | 0,5755 | 0,0011642 | 215,0 | 0,5751 |
| 220 | 0,0011845 | 225,6 | 0,5986 | 0,0011833 | 225,7 | 0,5982 | 0,0011822 | 225,7 | 0,5977 | 0,0011810 | 225,8 | 0,5973 |
| 230 | 0,0012032 | 236,6 | 0,6206 | 0,0012019 | 236,6 | 0,6202 | 0,0012006 | 236,7 | 0,6196 | 0,0011993 | 236,7 | 0,6192 |
| 240 | 0,0012236 | 247,8 | 0,6423 | 0,0012221 | 247,8 | 0,6423 | 0,0012206 | 247,9 | 0,6417 | 0,0012192 | 247,9 | 0,6412 |
| 250 | 0,0012460 | 259,2 | 0,6649 | 0,0012443 | 259,2 | 0,6643 | 0,0012425 | 259,3 | 0,6638 | 0,0012409 | 259,3 | 0,6632 |
| 260 | 0,0012709 | 270,9 | 0,6871 | 0,0012639 | 270,9 | 0,6864 | 0,0012669 | 270,9 | 0,6858 | 0,0012650 | 270,9 | 0,6852 |
| 270 | 0,0012939 | 282,9 | 0,7092 | 0,0012965 | 282,9 | 0,7085 | 0,0012942 | 282,7 | 0,7078 | 0,0012919 | 282,7 | 0,7071 |
| 280 | 0,0013203 | 295,2 | 0,7317 | 0,0013279 | 295,1 | 0,7308 | 0,0013250 | 295,0 | 0,7300 | 0,0013222 | 294,9 | 0,7293 |
| 290 | 0,02381 | 688,2 | 1,4011 | 0,0013640 | 307,9 | 0,7538 | 0,0013604 | 307,7 | 0,7523 | 0,0013569 | 307,5 | 0,7520 |
| 300 | 0,03029 | 678,6 | 1,4196 | 0,02503 | 666,6 | 1,3871 | 0,0014024 | 320,9 | 0,7762 | 0,0013979 | 320,7 | 0,7751 |
| 310 | 0,03163 | 688,1 | 1,4361 | 0,02635 | 677,8 | 1,4067 | 0,02213 | 665,9 | 1,3765 | 0,01851 | 651,7 | 1,3435 |
| 320 | 0,03287 | 696,9 | 1,4510 | 0,02757 | 687,9 | 1,4239 | 0,02336 | 677,6 | 1,3968 | 0,01988 | 665,9 | 1,3685 |
| 330 | 0,03403 | 705,1 | 1,4646 | 0,02870 | 697,1 | 1,4398 | 0,02448 | 688,2 | 1,4145 | 0,02105 | 678,2 | 1,3891 |
| 340 | 0,03512 | 712,8 | 1,4772 | 0,02976 | 705,6 | 1,4533 | 0,02553 | 697,9 | 1,4302 | 0,02210 | 689,0 | 1,4070 |
| 350 | 0,03615 | 720,1 | 1,4891 | 0,03076 | 713,6 | 1,4663 | 0,02652 | 706,8 | 1,4445 | 0,02307 | 698,8 | 1,4230 |
| 360 | 0,03714 | 727,2 | 1,5005 | 0,03171 | 721,2 | 1,4785 | 0,02745 | 715,0 | 1,4577 | 0,02397 | 707,8 | 1,4374 |
| 370 | 0,03810 | 734,1 | 1,5114 | 0,03261 | 728,5 | 1,4900 | 0,02832 | 722,7 | 1,4700 | 0,02481 | 716,2 | 1,4506 |
| 380 | 0,03903 | 740,8 | 1,5218 | 0,03348 | 735,6 | 1,5009 | 0,02914 | 730,1 | 1,4815 | 0,02561 | 724,2 | 1,4629 |
| 390 | 0,03994 | 747,3 | 1,5317 | 0,03433 | 742,5 | 1,5113 | 0,02993 | 737,3 | 1,4923 | 0,02637 | 731,9 | 1,4744 |
| 400 | 0,04084 | 753,7 | 1,5413 | 0,03515 | 749,2 | 1,5213 | 0,03070 | 744,3 | 1,5027 | 0,02710 | 739,3 | 1,4853 |
| 410 | 0,04173 | 760,0 | 1,5506 | 0,03595 | 755,7 | 1,5310 | 0,03145 | 751,1 | 1,5128 | 0,02781 | 746,5 | 1,4958 |
| 420 | 0,04260 | 766,3 | 1,5596 | 0,03674 | 762,1 | 1,5404 | 0,03218 | 757,8 | 1,5226 | 0,02850 | 753,5 | 1,5060 |
| 430 | 0,04346 | 772,5 | 1,5684 | 0,03752 | 768,5 | 1,5495 | 0,03289 | 764,4 | 1,5321 | 0,02917 | 760,3 | 1,5159 |
| 440 | 0,04430 | 778,6 | 1,5770 | 0,03829 | 774,8 | 1,5584 | 0,03359 | 770,9 | 1,5413 | 0,02982 | 767,0 | 1,5255 |
| 450 | 0,04513 | 784,6 | 1,5854 | 0,03903 | 781,0 | 1,5671 | 0,03428 | 777,3 | 1,5502 | 0,03046 | 773,6 | 1,5348 |
| 460 | 0,04596 | 790,5 | 1,5936 | 0,03977 | 787,1 | 1,5755 | 0,03496 | 783,6 | 1,5589 | 0,03109 | 780,1 | 1,5438 |
| 470 | 0,04678 | 796,4 | 1,6016 | 0,04050 | 793,2 | 1,5837 | 0,03563 | 789,9 | 1,5674 | 0,03171 | 786,5 | 1,5525 |
| 480 | 0,04759 | 802,3 | 1,6095 | 0,04122 | 799,2 | 1,5917 | 0,03629 | 796,1 | 1,5757 | 0,03232 | 792,8 | 1,5609 |
| 490 | 0,04839 | 808,2 | 1,6172 | 0,04194 | 805,2 | 1,5996 | 0,03694 | 802,2 | 1,5833 | 0,03292 | 799,1 | 1,5691 |
| 500 | 0,04918 | 814,1 | 1,6248 | 0,04265 | 811,2 | 1,6073 | 0,03758 | 808,2 | 1,5917 | 0,03352 | 805,3 | 1,5772 |
| 510 | 0,04996 | 819,9 | 1,6323 | 0,04335 | 817,1 | 1,6149 | 0,03821 | 814,3 | 1,5994 | 0,03411 | 811,5 | 1,5851 |
| 520 | 0,05073 | 825,7 | 1,6396 | 0,04405 | 823,0 | 1,6224 | 0,03884 | 820,3 | 1,6069 | 0,03469 | 817,7 | 1,5928 |
| 530 | 0,05150 | 831,4 | 1,6468 | 0,04474 | 828,9 | 1,6298 | 0,03947 | 826,3 | 1,6143 | 0,03526 | 823,8 | 1,6004 |
| 540 | 0,05227 | 837,2 | 1,6540 | 0,04542 | 834,8 | 1,6370 | 0,04009 | 832,4 | 1,6217 | 0,03583 | 829,9 | 1,6079 |
| 550 | 0,05303 | 843,0 | 1,6611 | 0,04610 | 840,6 | 1,6441 | 0,04070 | 838,4 | 1,6290 | 0,03639 | 836,0 | 1,6153 |

Продолжение табл. 41

| t | 120 ага | | | 140 ага | | | 160 ага | | | 180 ага | | |
|-----|---|-------|--------|---|-------|--------|--|-------|--------|--|-------|--------|
| | t' = 323,15 v'' = 0,01464 i'' = 641,9 s'' = 1,3138 | | | t' = 335,09 v'' = 0,01181 i'' = 631,0 s'' = 1,2858 | | | t' = 345,74 v'' = 0,009616 i'' = 618,3 s'' = 1,2564 | | | t' = 355,35 v'' = 0,007809 i'' = 602,5 s'' = 1,2251 | | |
| | v | t | s | v | t | s | v | t | s | v | t | s |
| 0 | 0,0009943 | 2,9 | 0,0002 | 0,0009933 | 3,3 | 0,0002 | 0,0009924 | 3,8 | 0,0002 | 0,0009914 | 4,3 | 0,0002 |
| 10 | 0,0009949 | 12,7 | 0,0357 | 0,0009940 | 13,2 | 0,0357 | 0,0009932 | 13,6 | 0,0356 | 0,0009922 | 14,1 | 0,0356 |
| 20 | 0,0009966 | 22,7 | 0,0701 | 0,0009958 | 23,1 | 0,0700 | 0,0009950 | 23,5 | 0,0699 | 0,0009941 | 24,0 | 0,0698 |
| 30 | 0,0009993 | 32,6 | 0,1034 | 0,0009985 | 33,0 | 0,1032 | 0,0009976 | 33,4 | 0,1031 | 0,0009968 | 33,8 | 0,1030 |
| 40 | 0,0010028 | 42,5 | 0,1355 | 0,0010019 | 42,9 | 0,1352 | 0,0010011 | 43,3 | 0,1351 | 0,0010003 | 43,7 | 0,1350 |
| 50 | 0,0010069 | 52,4 | 0,1665 | 0,0010061 | 52,8 | 0,1663 | 0,0010052 | 53,2 | 0,1661 | 0,0010044 | 53,6 | 0,1659 |
| 60 | 0,0010117 | 62,3 | 0,1967 | 0,0010109 | 62,7 | 0,1965 | 0,0010100 | 63,1 | 0,1962 | 0,0010092 | 63,5 | 0,1959 |
| 70 | 0,0010172 | 72,2 | 0,2261 | 0,0010164 | 72,6 | 0,2258 | 0,0010155 | 73,0 | 0,2256 | 0,0010146 | 73,4 | 0,2253 |
| 80 | 0,0010234 | 82,2 | 0,2547 | 0,0010225 | 82,5 | 0,2544 | 0,0010216 | 82,9 | 0,2541 | 0,0010207 | 83,3 | 0,2538 |
| 90 | 0,0010301 | 92,1 | 0,2825 | 0,0010292 | 92,5 | 0,2822 | 0,0010283 | 92,9 | 0,2819 | 0,0010274 | 93,2 | 0,2816 |
| 100 | 0,0010375 | 102,1 | 0,3097 | 0,0010365 | 102,5 | 0,3094 | 0,0010356 | 102,9 | 0,3090 | 0,0010347 | 103,2 | 0,3087 |
| 110 | 0,0010454 | 112,2 | 0,3363 | 0,0010444 | 112,5 | 0,3359 | 0,0010434 | 112,9 | 0,3356 | 0,0010425 | 113,2 | 0,3352 |
| 120 | 0,0010540 | 122,2 | 0,3623 | 0,0010529 | 122,6 | 0,3619 | 0,0010519 | 122,9 | 0,3615 | 0,0010508 | 123,2 | 0,3611 |
| 130 | 0,0010631 | 132,3 | 0,3876 | 0,0010620 | 132,6 | 0,3872 | 0,0010609 | 133,0 | 0,3868 | 0,0010598 | 133,3 | 0,3863 |
| 140 | 0,0010728 | 142,4 | 0,4124 | 0,0010717 | 142,8 | 0,4119 | 0,0010705 | 143,1 | 0,4115 | 0,0010694 | 143,3 | 0,4110 |
| 150 | 0,0010832 | 152,6 | 0,4366 | 0,0010820 | 152,9 | 0,4361 | 0,0010808 | 153,2 | 0,4357 | 0,0010796 | 153,5 | 0,4352 |
| 160 | 0,0010943 | 162,8 | 0,4603 | 0,0010930 | 163,1 | 0,4598 | 0,0010917 | 163,4 | 0,4593 | 0,0010905 | 163,6 | 0,4588 |
| 170 | 0,0011062 | 173,1 | 0,4836 | 0,0011047 | 173,3 | 0,4830 | 0,0011033 | 173,6 | 0,4825 | 0,0011020 | 173,9 | 0,4819 |
| 180 | 0,0011188 | 183,5 | 0,5066 | 0,0011172 | 183,7 | 0,5060 | 0,0011157 | 183,9 | 0,5054 | 0,0011143 | 184,2 | 0,5048 |
| 190 | 0,0011322 | 193,9 | 0,5294 | 0,0011306 | 194,1 | 0,5288 | 0,0011289 | 194,3 | 0,5281 | 0,0011273 | 194,6 | 0,5275 |
| 200 | 0,0011466 | 204,5 | 0,5520 | 0,0011448 | 204,7 | 0,5513 | 0,0011430 | 204,9 | 0,5506 | 0,0011412 | 205,1 | 0,5499 |
| 210 | 0,0011621 | 215,1 | 0,5743 | 0,0011601 | 215,3 | 0,5735 | 0,0011582 | 215,5 | 0,5727 | 0,0011562 | 215,6 | 0,5720 |
| 220 | 0,0011788 | 225,9 | 0,5964 | 0,0011766 | 226,1 | 0,5955 | 0,0011744 | 226,2 | 0,5946 | 0,0011722 | 226,3 | 0,5938 |
| 230 | 0,0011965 | 236,8 | 0,6183 | 0,0011943 | 237,0 | 0,6174 | 0,0011919 | 237,0 | 0,6164 | 0,0011895 | 237,2 | 0,6155 |
| 240 | 0,0012163 | 248,0 | 0,6402 | 0,0012136 | 248,0 | 0,6392 | 0,0012108 | 248,1 | 0,6382 | 0,0012084 | 248,2 | 0,6372 |
| 250 | 0,0012377 | 259,3 | 0,6621 | 0,0012346 | 259,3 | 0,6610 | 0,0012314 | 259,3 | 0,6599 | 0,0012284 | 259,4 | 0,6588 |
| 260 | 0,0012613 | 270,8 | 0,6839 | 0,0012576 | 270,8 | 0,6827 | 0,0012541 | 270,7 | 0,6816 | 0,0012505 | 270,7 | 0,6804 |
| 270 | 0,0012875 | 282,6 | 0,7057 | 0,0012832 | 282,5 | 0,7044 | 0,0012791 | 282,4 | 0,7033 | 0,0012751 | 282,3 | 0,7020 |
| 280 | 0,0013169 | 294,6 | 0,7278 | 0,0013118 | 294,5 | 0,7263 | 0,0013070 | 294,4 | 0,7250 | 0,0013023 | 294,2 | 0,7236 |
| 290 | 0,0013505 | 307,1 | 0,7501 | 0,0013443 | 306,9 | 0,7484 | 0,0013385 | 306,6 | 0,7468 | 0,0013329 | 306,4 | 0,7453 |
| 300 | 0,0013897 | 320,1 | 0,7729 | 0,0013820 | 319,5 | 0,7709 | 0,0013746 | 319,1 | 0,7690 | 0,0013678 | 318,7 | 0,7673 |
| 310 | 0,001436 | 333,8 | 0,7966 | 0,001426 | 332,9 | 0,7942 | 0,001417 | 332,2 | 0,7919 | 0,001408 | 331,6 | 0,7898 |
| 320 | 0,001495 | 348,6 | 0,8222 | 0,001481 | 347,5 | 0,8189 | 0,001468 | 346,4 | 0,8159 | 0,001457 | 345,5 | 0,8133 |
| 330 | 0,01560 | 654,0 | 1,3344 | 0,001552 | 363,3 | 0,8457 | 0,001533 | 361,7 | 0,8416 | 0,001517 | 360,6 | 0,8391 |
| 340 | 0,01679 | 668,9 | 1,3592 | 0,01253 | 642,6 | 1,3050 | 0,001621 | 379,2 | 0,8705 | 0,001596 | 376,9 | 0,8651 |
| 350 | 0,01780 | 681,3 | 1,3797 | 0,01374 | 660,1 | 1,3336 | 0,010132 | 630,8 | 1,2767 | 0,001713 | 396,3 | 0,8970 |
| 360 | 0,01870 | 692,5 | 1,3976 | 0,01471 | 674,2 | 1,3561 | 0,01154 | 651,6 | 1,3106 | 0,00862 | 620,1 | 1,2533 |
| 370 | 0,01952 | 702,7 | 1,4135 | 0,01558 | 686,7 | 1,3758 | 0,01252 | 663,0 | 1,3365 | 0,00991 | 645,5 | 1,2935 |
| 380 | 0,02028 | 712,1 | 1,4279 | 0,01637 | 698,0 | 1,3932 | 0,01332 | 681,8 | 1,3531 | 0,01082 | 663,7 | 1,3218 |
| 390 | 0,02099 | 720,9 | 1,4411 | 0,01708 | 708,2 | 1,4088 | 0,01404 | 694,2 | 1,3769 | 0,01161 | 678,7 | 1,3446 |
| 400 | 0,02168 | 729,2 | 1,4534 | 0,01774 | 717,7 | 1,4230 | 0,01471 | 705,3 | 1,3934 | 0,01231 | 691,5 | 1,3640 |
| 410 | 0,02234 | 737,1 | 1,4650 | 0,01837 | 726,6 | 1,4361 | 0,01533 | 715,4 | 1,4083 | 0,01293 | 703,0 | 1,3809 |
| 420 | 0,02296 | 744,7 | 1,4761 | 0,01896 | 735,1 | 1,4483 | 0,01591 | 724,8 | 1,4219 | 0,01349 | 713,6 | 1,3961 |
| 430 | 0,02357 | 752,1 | 1,4867 | 0,01953 | 743,2 | 1,4598 | 0,01646 | 733,6 | 1,4345 | 0,01402 | 723,5 | 1,4100 |
| 440 | 0,02415 | 759,3 | 1,4969 | 0,02008 | 751,0 | 1,4708 | 0,01699 | 742,0 | 1,4463 | 0,01453 | 732,7 | 1,4230 |
| 450 | 0,02472 | 766,3 | 1,5067 | 0,02061 | 758,5 | 1,4813 | 0,01750 | 750,1 | 1,4576 | 0,01503 | 741,5 | 1,4352 |
| 460 | 0,02528 | 773,2 | 1,5162 | 0,02112 | 765,8 | 1,4914 | 0,01798 | 758,0 | 1,4684 | 0,01550 | 750,0 | 1,4465 |
| 470 | 0,02583 | 780,0 | 1,5254 | 0,02162 | 773,0 | 1,5011 | 0,01844 | 765,7 | 1,4788 | 0,01595 | 758,2 | 1,4578 |
| 480 | 0,02637 | 786,7 | 1,5343 | 0,02211 | 780,1 | 1,5105 | 0,01889 | 773,2 | 1,4888 | 0,01638 | 766,1 | 1,4684 |
| 490 | 0,02690 | 793,3 | 1,5429 | 0,02259 | 787,1 | 1,5196 | 0,01933 | 780,5 | 1,4984 | 0,01679 | 773,8 | 1,4785 |
| 500 | 0,02742 | 799,8 | 1,5513 | 0,02306 | 793,9 | 1,5284 | 0,01976 | 787,7 | 1,5077 | 0,01720 | 781,3 | 1,4882 |
| 510 | 0,02793 | 806,2 | 1,5595 | 0,02352 | 800,6 | 1,5370 | 0,02018 | 794,8 | 1,5167 | 0,01759 | 788,7 | 1,4976 |
| 520 | 0,02843 | 812,5 | 1,5675 | 0,02397 | 807,2 | 1,5454 | 0,02059 | 801,8 | 1,5254 | 0,01797 | 796,0 | 1,5067 |
| 530 | 0,02893 | 818,8 | 1,5754 | 0,02441 | 813,7 | 1,5536 | 0,02100 | 808,6 | 1,5338 | 0,01835 | 803,2 | 1,5159 |
| 540 | 0,02942 | 825,1 | 1,5832 | 0,02485 | 820,1 | 1,5616 | 0,02140 | 815,3 | 1,5420 | 0,01872 | 810,2 | 1,5242 |
| 550 | 0,02990 | 831,4 | 1,5909 | 0,02529 | 826,5 | 1,5694 | 0,02180 | 821,9 | 1,5500 | 0,01908 | 817,0 | 1,5325 |

Продолжение табл. 41

| t | 200 ama | | | 220 ama | | | 240 ama | | | 260 ama | | |
|-----|---|-------|--------|--|-------|--------|------------------|-------|--------|------------------|-------|--------|
| | $t'=364,08$ $v''=0,00620$ $i''=582,3$ $s''=1,1883$ | | | $t'=372,1$ $v''=0,00449$ $i''=547,0$ $s''=1,1310$ | | | v | i | s | v | i | s |
| | v | i | s | v | i | s | | | | | | |
| 0 | 0,0009905 | 4,7 | 0,0003 | 0,0009896 | 5,2 | 0,0003 | 0,0009887 | 5,7 | 0,0003 | 0,0009877 | 6,1 | 0,0003 |
| 10 | 0,0009914 | 14,6 | 0,0355 | 0,0009905 | 15,0 | 0,0355 | 0,0009897 | 15,5 | 0,0355 | 0,0009888 | 15,9 | 0,0354 |
| 20 | 0,0009933 | 24,4 | 0,0697 | 0,0009924 | 24,8 | 0,0696 | 0,0009916 | 25,3 | 0,0695 | 0,0009908 | 25,7 | 0,0695 |
| 30 | 0,0009960 | 34,3 | 0,1028 | 0,0009952 | 34,7 | 0,1026 | 0,0009944 | 35,1 | 0,1025 | 0,0009936 | 35,5 | 0,1024 |
| 40 | 0,0009995 | 44,1 | 0,1347 | 0,0009986 | 44,5 | 0,1345 | 0,0009978 | 44,9 | 0,1354 | 0,0009970 | 45,3 | 0,1342 |
| 50 | 0,0010030 | 54,0 | 0,1657 | 0,0010027 | 54,4 | 0,1655 | 0,0010019 | 54,8 | 0,1653 | 0,0010011 | 55,2 | 0,1651 |
| 60 | 0,0010083 | 63,8 | 0,1958 | 0,0010075 | 64,2 | 0,1955 | 0,0010067 | 64,6 | 0,1953 | 0,0010058 | 65,0 | 0,1951 |
| 70 | 0,0010137 | 73,7 | 0,2251 | 0,0010129 | 74,1 | 0,2248 | 0,0010121 | 75,5 | 0,2245 | 0,0010112 | 74,9 | 0,2243 |
| 80 | 0,0010198 | 83,7 | 0,2536 | 0,0010190 | 84,0 | 0,2533 | 0,0010181 | 84,4 | 0,2530 | 0,0010172 | 84,8 | 0,2527 |
| 90 | 0,0010265 | 93,6 | 0,2813 | 0,0010256 | 94,0 | 0,2811 | 0,0010247 | 94,3 | 0,2807 | 0,0010238 | 94,7 | 0,2804 |
| 100 | 0,0010337 | 103,6 | 0,3084 | 0,0010328 | 103,9 | 0,3081 | 0,0010318 | 104,3 | 0,3077 | 0,0010309 | 104,6 | 0,3074 |
| 110 | 0,0010415 | 113,6 | 0,3348 | 0,0010405 | 113,9 | 0,3345 | 0,0010395 | 114,3 | 0,3341 | 0,0010386 | 114,6 | 0,3337 |
| 120 | 0,0010498 | 123,6 | 0,3607 | 0,0010488 | 123,9 | 0,3603 | 0,0010478 | 124,3 | 0,3599 | 0,0010468 | 124,6 | 0,3595 |
| 130 | 0,0010588 | 133,7 | 0,3859 | 0,0010577 | 133,9 | 0,3855 | 0,0010567 | 134,3 | 0,3851 | 0,0010556 | 134,6 | 0,3847 |
| 140 | 0,0010682 | 143,7 | 0,4106 | 0,0010671 | 144,0 | 0,4101 | 0,0010661 | 144,3 | 0,4097 | 0,0010651 | 144,6 | 0,4093 |
| 150 | 0,0010784 | 153,8 | 0,4347 | 0,0010772 | 154,1 | 0,4342 | 0,0010760 | 154,4 | 0,4338 | 0,0010749 | 154,7 | 0,4333 |
| 160 | 0,0010892 | 163,9 | 0,4583 | 0,0010879 | 164,2 | 0,4578 | 0,0010865 | 164,5 | 0,4573 | 0,0010854 | 164,8 | 0,4568 |
| 170 | 0,0011006 | 174,1 | 0,4814 | 0,0010992 | 174,4 | 0,4809 | 0,0010979 | 174,7 | 0,4804 | 0,0010966 | 175,0 | 0,4799 |
| 180 | 0,0011128 | 184,4 | 0,5042 | 0,0011113 | 184,7 | 0,5037 | 0,0011099 | 184,9 | 0,5031 | 0,0011085 | 185,2 | 0,5026 |
| 190 | 0,0011257 | 194,8 | 0,5268 | 0,0011242 | 195,0 | 0,5262 | 0,0011226 | 195,2 | 0,5256 | 0,0011211 | 195,5 | 0,5250 |
| 200 | 0,0011395 | 205,3 | 0,5492 | 0,0011378 | 205,4 | 0,5485 | 0,0011362 | 205,6 | 0,5477 | 0,0011345 | 205,8 | 0,5472 |
| 210 | 0,0011543 | 215,8 | 0,5712 | 0,0011524 | 216,0 | 0,5705 | 0,0011506 | 216,1 | 0,5698 | 0,0011488 | 216,3 | 0,5690 |
| 220 | 0,0011701 | 226,5 | 0,5930 | 0,0011680 | 226,6 | 0,5922 | 0,0011660 | 226,7 | 0,5914 | 0,0011640 | 226,9 | 0,5906 |
| 230 | 0,0011871 | 237,3 | 0,6147 | 0,0011848 | 237,4 | 0,6138 | 0,0011826 | 237,5 | 0,6129 | 0,0011804 | 237,6 | 0,6121 |
| 240 | 0,0012055 | 248,2 | 0,6363 | 0,0012029 | 248,3 | 0,6353 | 0,0012005 | 248,4 | 0,6343 | 0,0011980 | 248,5 | 0,6334 |
| 250 | 0,0012254 | 259,4 | 0,6578 | 0,0012225 | 259,4 | 0,6567 | 0,0012198 | 259,5 | 0,6557 | 0,0012170 | 259,5 | 0,6547 |
| 260 | 0,0012472 | 270,7 | 0,6792 | 0,0012439 | 270,7 | 0,6781 | 0,0012408 | 270,7 | 0,6769 | 0,0012376 | 270,7 | 0,6758 |
| 270 | 0,0012712 | 282,2 | 0,7007 | 0,0012674 | 282,2 | 0,6994 | 0,0012638 | 282,1 | 0,6982 | 0,0012602 | 282,1 | 0,6970 |
| 280 | 0,0012977 | 294,0 | 0,7222 | 0,0012933 | 293,9 | 0,7208 | 0,0012891 | 293,8 | 0,7195 | 0,0012850 | 293,7 | 0,7181 |
| 290 | 0,0013274 | 306,1 | 0,7437 | 0,0013222 | 305,8 | 0,7422 | 0,0013172 | 305,7 | 0,7408 | 0,0013125 | 305,5 | 0,7393 |
| 300 | 0,0013612 | 318,4 | 0,7655 | 0,0013549 | 318,0 | 0,7638 | 0,0013485 | 317,8 | 0,7622 | 0,0013433 | 317,5 | 0,7605 |
| 310 | 0,001400 | 331,1 | 0,7878 | 0,001392 | 330,8 | 0,7859 | 0,001385 | 330,4 | 0,7840 | 0,001378 | 330,0 | 0,7821 |
| 320 | 0,001446 | 344,7 | 0,8109 | 0,001436 | 344,2 | 0,8087 | 0,001427 | 343,6 | 0,8065 | 0,001418 | 343,0 | 0,8043 |
| 330 | 0,001502 | 359,2 | 0,8351 | 0,001483 | 358,3 | 0,8324 | 0,001477 | 357,4 | 0,8298 | 0,001466 | 356,6 | 0,8273 |
| 340 | 0,001573 | 375,0 | 0,8611 | 0,001554 | 373,5 | 0,8575 | 0,001538 | 372,2 | 0,8544 | 0,001523 | 371,1 | 0,8513 |
| 350 | 0,001671 | 393,1 | 0,8904 | 0,001641 | 390,6 | 0,8852 | 0,001617 | 388,5 | 0,8808 | 0,001596 | 386,8 | 0,8768 |
| 360 | 0,001841 | 416,5 | 0,9288 | 0,001768 | 411,0 | 0,9179 | 0,001722 | 407,3 | 0,9108 | 0,001688 | 404,5 | 0,9055 |
| 370 | 0,002046 | 440,2 | 0,9716 | 0,002085 | 443,6 | 0,9689 | 0,002014 | 432,2 | 0,9498 | 0,002034 | 426,0 | 0,9382 |
| 380 | 0,00870 | 640,0 | 1,2777 | 0,00662 | 606,7 | 1,2215 | 0,00370 | 526,0 | 1,0942 | 0,00230 | 457,2 | 0,9869 |
| 390 | 0,00953 | 660,3 | 1,3090 | 0,00771 | 636,5 | 1,2663 | 0,00463 | 566,0 | 1,2155 | 0,00424 | 556,2 | 1,1372 |
| 400 | 0,01033 | 676,1 | 1,3330 | 0,00862 | 657,5 | 1,2981 | 0,00508 | 635,8 | 1,2600 | 0,00566 | 608,1 | 1,2143 |
| 410 | 0,01098 | 689,5 | 1,3527 | 0,00931 | 674,3 | 1,3236 | 0,00578 | 657,7 | 1,2923 | 0,00656 | 637,2 | 1,2577 |
| 420 | 0,01156 | 701,5 | 1,3701 | 0,00993 | 688,6 | 1,3445 | 0,00651 | 675,0 | 1,3175 | 0,00728 | 658,1 | 1,2881 |
| 430 | 0,01209 | 712,4 | 1,3858 | 0,01047 | 700,8 | 1,3622 | 0,00693 | 689,2 | 1,3379 | 0,00789 | 775,1 | 1,3125 |
| 440 | 0,01258 | 722,6 | 1,4001 | 0,01097 | 711,8 | 1,3778 | 0,00695 | 701,7 | 1,3554 | 0,00841 | 689,5 | 1,3328 |
| 450 | 0,01306 | 732,2 | 1,4134 | 0,01143 | 722,3 | 1,3922 | 0,01006 | 712,0 | 1,3712 | 0,00889 | 701,2 | 1,3503 |
| 460 | 0,01352 | 741,3 | 1,4259 | 0,01186 | 732,3 | 1,4058 | 0,01049 | 722,8 | 1,3860 | 0,00933 | 712,8 | 1,3663 |
| 470 | 0,01395 | 750,1 | 1,4378 | 0,01227 | 741,8 | 1,4186 | 0,01089 | 733,0 | 1,3997 | 0,00974 | 723,7 | 1,3811 |
| 480 | 0,01436 | 758,6 | 1,4491 | 0,01267 | 750,9 | 1,4306 | 0,01128 | 742,7 | 1,4125 | 0,01011 | 734,1 | 1,3948 |
| 490 | 0,01475 | 766,8 | 1,4598 | 0,01305 | 759,6 | 1,4419 | 0,01165 | 751,8 | 1,4245 | 0,01046 | 744,0 | 1,4076 |
| 500 | 0,01513 | 774,7 | 1,4700 | 0,01341 | 767,9 | 1,4527 | 0,01200 | 760,8 | 1,4358 | 0,01079 | 753,4 | 1,4197 |
| 510 | 0,01550 | 782,4 | 1,4796 | 0,01376 | 776,0 | 1,4630 | 0,01234 | 769,4 | 1,4466 | 0,01111 | 762,4 | 1,4311 |
| 520 | 0,01587 | 790,0 | 1,4893 | 0,01411 | 783,9 | 1,4729 | 0,01267 | 777,7 | 1,4570 | 0,01143 | 771,1 | 1,4419 |
| 530 | 0,01622 | 797,4 | 1,4985 | 0,01445 | 791,6 | 1,4824 | 0,01299 | 785,7 | 1,4670 | 0,01174 | 779,5 | 1,4522 |
| 540 | 0,01656 | 804,6 | 1,5074 | 0,01479 | 799,1 | 1,4916 | 0,01332 | 793,5 | 1,4766 | 0,01205 | 787,7 | 1,4622 |
| 550 | 0,01690 | 811,7 | 1,5161 | 0,01512 | 806,5 | 1,5005 | 0,01363 | 801,1 | 1,4859 | 0,01236 | 795,7 | 1,4719 |

Продолжение табл. 41

| t | 280 ата | | | 300 ата | | |
|-----|-----------|-------|--------|-----------|-------|--------|
| | v | i | s | v | i | s |
| 0 | 0,0009868 | 6,6 | 0,0003 | 0,0009859 | 7,1 | 0,0003 |
| 10 | 0,0009880 | 16,4 | 0,0354 | 0,0009871 | 16,8 | 0,0354 |
| 20 | 0,0009900 | 26,2 | 0,0694 | 0,0009892 | 26,6 | 0,0693 |
| 30 | 0,0009928 | 36,0 | 0,1022 | 0,0009920 | 36,4 | 0,1021 |
| 40 | 0,0009962 | 45,8 | 0,1340 | 0,0009954 | 46,2 | 0,1338 |
| 50 | 0,0010003 | 55,6 | 0,1649 | 0,0009995 | 56,0 | 0,1647 |
| 60 | 0,0010050 | 65,4 | 0,1949 | 0,0010042 | 65,8 | 0,1947 |
| 70 | 0,0010104 | 75,3 | 0,2241 | 0,0010096 | 75,7 | 0,2238 |
| 80 | 0,0010164 | 85,2 | 0,2525 | 0,0010154 | 85,5 | 0,2522 |
| 90 | 0,0010229 | 95,1 | 0,2802 | 0,0010220 | 95,4 | 0,2799 |
| 100 | 0,0010300 | 105,0 | 0,3072 | 0,0010291 | 105,4 | 0,3068 |
| 110 | 0,0010376 | 115,0 | 0,3334 | 0,0010367 | 115,3 | 0,3330 |
| 120 | 0,0010458 | 124,9 | 0,3591 | 0,0010448 | 125,3 | 0,3587 |
| 130 | 0,0010546 | 134,9 | 0,3842 | 0,0010535 | 135,2 | 0,3838 |
| 140 | 0,0010639 | 144,9 | 0,4088 | 0,0010628 | 145,2 | 0,4084 |
| 150 | 0,0010737 | 155,0 | 0,4329 | 0,0010726 | 155,3 | 0,4324 |
| 160 | 0,0010842 | 165,1 | 0,4564 | 0,0010830 | 165,4 | 0,4559 |
| 170 | 0,0010953 | 175,2 | 0,4794 | 0,0010940 | 175,5 | 0,4789 |
| 180 | 0,0011071 | 185,5 | 0,5020 | 0,0011057 | 185,7 | 0,5015 |
| 190 | 0,0011196 | 195,7 | 0,5244 | 0,0011181 | 195,9 | 0,5239 |
| 200 | 0,0011328 | 206,0 | 0,5466 | 0,0011312 | 206,2 | 0,5459 |
| 210 | 0,0011470 | 216,5 | 0,5683 | 0,0011452 | 216,6 | 0,5676 |
| 220 | 0,0011621 | 227,0 | 0,5898 | 0,0011602 | 227,1 | 0,5890 |
| 230 | 0,0011782 | 237,7 | 0,6112 | 0,0011761 | 237,8 | 0,6103 |
| 240 | 0,0011956 | 248,6 | 0,6324 | 0,0011933 | 248,6 | 0,6315 |
| 250 | 0,0012144 | 259,6 | 0,6537 | 0,0012118 | 259,6 | 0,6528 |
| 260 | 0,0012347 | 270,7 | 0,6747 | 0,0012317 | 270,7 | 0,6736 |
| 270 | 0,0012568 | 282,0 | 0,6957 | 0,0012534 | 282,0 | 0,6945 |
| 280 | 0,0012811 | 293,6 | 0,7167 | 0,0012773 | 293,5 | 0,7154 |
| 290 | 0,0013080 | 305,4 | 0,7378 | 0,0013036 | 305,2 | 0,7364 |
| 300 | 0,0013380 | 317,3 | 0,7589 | 0,0013328 | 317,0 | 0,7574 |
| 310 | 0,001372 | 329,6 | 0,7803 | 0,001366 | 329,2 | 0,7786 |
| 320 | 0,001410 | 342,4 | 0,8022 | 0,001403 | 342,0 | 0,8002 |
| 330 | 0,001455 | 355,9 | 0,8249 | 0,001446 | 355,3 | 0,8225 |
| 340 | 0,001510 | 370,0 | 0,8484 | 0,001497 | 369,1 | 0,8456 |
| 350 | 0,001577 | 385,3 | 0,8729 | 0,001558 | 383,9 | 0,8694 |
| 360 | 0,001659 | 402,2 | 0,9006 | 0,001635 | 400,2 | 0,8958 |
| 370 | 0,001779 | 421,6 | 0,9310 | 0,00174 | 418,4 | 0,9240 |
| 380 | 0,00202 | 446,4 | 0,9692 | 0,00190 | 440,2 | 0,9577 |
| 390 | 0,00284 | 490,5 | 1,0360 | 0,00226 | 470,2 | 1,0034 |
| 400 | 0,00427 | 571,5 | 1,1571 | 0,00302 | 524,5 | 1,0847 |
| 410 | 0,00537 | 613,0 | 1,2182 | 0,00429 | 582,2 | 1,1698 |
| 420 | 0,00618 | 639,0 | 1,2560 | 0,00518 | 616,8 | 1,2201 |
| 430 | 0,00684 | 659,3 | 1,2852 | 0,00589 | 641,5 | 1,2555 |
| 440 | 0,00738 | 676,0 | 1,3086 | 0,00648 | 660,8 | 1,2827 |
| 450 | 0,00785 | 689,6 | 1,3283 | 0,00696 | 676,9 | 1,3056 |
| 460 | 0,00830 | 702,3 | 1,3462 | 0,00741 | 691,3 | 1,3259 |
| 470 | 0,00870 | 714,2 | 1,3625 | 0,00782 | 704,4 | 1,3439 |
| 480 | 0,00907 | 725,4 | 1,3774 | 0,00820 | 716,4 | 1,3600 |
| 490 | 0,00942 | 735,9 | 1,3911 | 0,00855 | 727,5 | 1,3747 |
| 500 | 0,00975 | 745,8 | 1,4039 | 0,00888 | 737,9 | 1,3883 |
| 510 | 0,01007 | 755,3 | 1,4159 | 0,00918 | 747,9 | 1,4010 |
| 520 | 0,01038 | 764,4 | 1,4273 | 0,00947 | 757,5 | 1,4130 |
| 530 | 0,01068 | 773,2 | 1,4381 | 0,00976 | 766,7 | 1,4243 |
| 540 | 0,01098 | 781,7 | 1,4485 | 0,01005 | 775,6 | 1,4351 |
| 550 | 0,01127 | 790,0 | 1,4585 | 0,01034 | 784,2 | 1,4455 |

отрезки изобаро-изотермических процессов $b-c$ должны быть поделены в одинаковом отношении, и через полученные точки пройдёт кривая $x = \text{const}$.

На диаграмме с учётом масштабов площадь под кривой процесса $a-b$ даёт теплоту жидкости q' , подводимую к жидкости в условиях равновесия её с насыщенным паром для достижения жидкостью температуры кипения T' (t'), отвечающей заданному давлению p ; площадь под изобаро-изотермой $b-c$ даёт теплоту парообразования (скрытую) $-r$; площадь же под участком изобаро-изотермы $b-m$ — теплоту парообразования влажного пара $r \cdot x$. Площадь под изобарой $c-d$ даёт теплоту перегрева

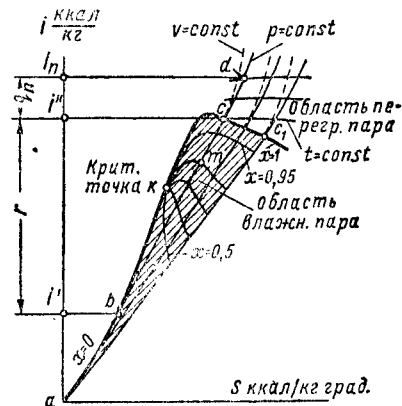
$$q_n = \int_{T'}^{T_n} c_p dT.$$

На диаграмме $T-s$ могут быть нанесены также процессы $v = \text{const}$. В. Шюле заменяет нанесение изохор комбинированной диаграммой $T-v-s$, представляющей совмещение диаграмм $T-s$ и $T-v$ [47].

Схема диаграммы $i-s$ для водяного пара приведена на фиг. 45.

На диаграмме нанесены нижняя $a-b-k$ и верхняя $k-c-s_1$ пограничные кривые.

Обычно принимают для начального состояния ($t = 0^\circ\text{C}$) жидкости, находящейся в равновесии с насыщенным паром, энтальпию $i' = 0$ и энтропию $s'_0 = 0$. Построение кривых ведётся по точкам, значения i' , s' , i'' , s'' берутся из таблиц для пара. Кривые $a-b-k$ и $k-c-s_1$ сходятся в критическом



Фиг. 45

состоянии (точка k); кривая $a-b-k$ идёт из начала координат; максимальная ордината правой пограничной кривой отвечает максимуму значения энтальпии сухого насыщенного пара. В области насыщения между пограничными кривыми изобары и изотермы совпадают (процессы $b-c$), здесь они представлены пучком расходящихся прямых. В области перегрева изобары круто поднимаются вверх, имея логарифмический характер; изотермы круто меняют направления и представлены пологими кривыми, идущими

в сторону возрастания энтропии. Степень сухости x определяется отношением отрезков $b-m$ и $b-c$, $x = \frac{bm}{bc}$; кривые $x = \text{const}$

строятся так же, как и в диаграмме $T-s$.

Энтальпия заданного состояния прочитывается по оси ординат; если b, c, d — состояния жидкости, сухого пара, перегретого пара при заданном давлении p , то значения i', i'', i_n найдутся проектированием этих точек на ось ординат, причём $i'' - i' = r$, $i_n - i'' = q_n$. Соотношение $i = u + Arv$ позволяет для всех случаев находить внутреннюю энергию как $u = i - Arv$; так, например, $u'' = i'' - Arv''$. На диаграмме $i-s$ в области перегрева обычно наносят семейство процессов $v = \text{const}$. Эти кривые протекают круче изобар, сохраняя тот же характер. Точка в области перегретого пара определяет его удельный объём, оцениваемый по значениям изохор, между которыми находится рассматриваемая точка; для определения объёмов влажного пара используется выражение $v_x \approx v'' \cdot x$; для состояния влажного пара, заданного давлением p и степенью сухости x , находят по точке на верхней пограничной кривой для данного давления v'' объём сухого пара, а по нему $v_x \approx v'' \cdot x$.

ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Изобарный процесс ($p = \text{const}$). В области насыщения процесс при $p = \text{const}$ является одновременно процессом изотермическим ($t = t'$ — температура насыщенного пара данного давления). Если v_1, x_1, v_2, x_2 — удельные объёмы и степени сухости начального и конечного состояний, то

$$\begin{aligned} v_1 &= v'' \cdot x_1 + (1 - x_1) v'; \\ v_2 &= v'' \cdot x_2 + (1 - x_2) v'; \end{aligned}$$

для случаев не очень большой влажности

$$\begin{aligned} v_1 &\approx v'' \cdot x_1; \\ v_2 &\approx v'' \cdot x_2; \\ \frac{v_1}{v_2} &= \frac{x_1}{x_2}; \end{aligned}$$

количество теплоты, подводимое в процессе,

$$q_p = \lambda_2 - \lambda_1 = i_2 - i_1 \text{ [кал/кг]};$$

работа процесса

$$l_p = p (v_2 - v_1) \text{ [кдж/кг]}.$$

Если в процессе сообщения теплоты конечное состояние является перегретым паром, то для определения этого состояния необходимо знать либо v_2 , либо t_2 ; тогда уравнение состояния $f(p, v, t) = 0$ позволит найти третий недостающий параметр или он может быть найден по диаграммам $i-s$, $T-v-s$, $T-s$; теплота процесса и работа его находятся так же, как и в области насыщения.

Изотермический процесс $t = \text{const}$ ($T = \text{const}$). В области перегретого пара (в области насыщенного см. процесс $p = \text{const}$) для нахождения параметров конечного состояния может быть использовано уравнение состояния перегретого пара $f(p, v, t) = 0$ или они определяются по диаграммам. Теп-

лота процесса $q_T = T (s_2 - s_1)$ [кал/кг]; приращение энтропии легче всего определяется из диаграмм $i-s$ или $T-s$; изменение внутренней энергии

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (i_2 - Ar_2 v_2) - (i_1 - Ar_1 v_1);$$

работа процесса

$$l = \frac{1}{A} (q_T - \Delta u) \text{ [кдж/кг]}.$$

Изохорный процесс ($v = \text{const}$). В области насыщения условие $v_2 = v_1$ даёт

$$v'_1 \cdot x_1 + v'_1 (1 - x_1) = v'_2 \cdot x_2 + v'_2 (1 - x_2),$$

где удельные объёмы жидкости v' и сухого пара v'' с подстрочным индексом 1 берутся по давлению начальному (p_1), а с индексом 2 — по конечному (p_2); при не очень большой влажности, пренебрегая объёмом влаги, получаем более простое соотношение

$$v'_1 \cdot x_1 \approx v'_2 \cdot x_2.$$

Из приведённых выражений находится степень сухости конечного состояния. В случае, когда конечным состоянием является перегретый пар, параметры его могут находиться по уравнению состояния перегретого пара или из диаграмм. Работа процесса равна нулю ($v_2 = v_1 = v$). Теплота процесса находится по разности внутренних энергий

$$\begin{aligned} q_v &= u_2 - u_1 = (i_2 - Ar_2 v) - (i_1 - Ar_1 v) = \\ &= i_2 - i_1 + A (p_1 - p_2) v \text{ [кал/кг]}. \end{aligned}$$

Адиабатный процесс ($dq = 0$, $q = 0$). Обратимый адиабатный процесс (так как $dq = T \cdot ds$, $T \neq 0$, $ds = 0$) определяется условием $s_2 = s_1$, которое и может быть использовано для определения параметров конечного состояния; аналитическое решение задачи нахождения конечных параметров сложно, наоборот, решение по энтропийным диаграммам ($i-s$ и $T-s$), где адиабаты изображаются прямыми, параллельными оси ординат, весьма просто; адиабаты расширения из начального состояния идут по вертикали вниз, адиабаты сжатия — вверх; конечное состояние определяется пересечением адиабаты с кривой, характеризующей заданный параметр конечного состояния (например изобары конечного давления p_2). Работа процесса находится по разности внутренних энергий начального и конечного состояний.

$$l = \frac{u_1 - u_2}{A} = 427 (u_1 - u_2) =$$

$$= 427 (i_1 - i_2) - (p_1 v_1 - p_2 v_2) \text{ [кдж/кг]}.$$

Цейнером предложены приближённые уравнения: при перегретом паре $pv^{1,333} = \text{const}$ уравнение применимо для процесса, полностью идущего в области перегрева; если расширение, начавшееся в области перегрева, переходит в область насыщения, то применимость уравнения $pv^{1,333} = \text{const}$ ограничивается моментом, когда пар, расширяясь, достигнет верхней пограничной кривой, для которой можно принять уравнение $pv \approx 2$, где p [кг/см²], v [м³/кг]. Дальнейшее расширение, начинающееся от состояния сухого пара, по Цейнеру, подчиняется уравнению $pv^{1,135} = \text{const}$. Для влажного пара с началь-

ной степенью сухости x в пределах от 0,1 до 0,7 адиабатное расширение идёт по уравнению $p v^{1,035 + 0,1 x} = \text{const}$. По Каллендеру, для перегретого пара действительно

$$\frac{p}{T^3} = \text{const}; \text{ для малых и средних давлений используется также формула } \frac{p v}{T} = \text{const}.$$

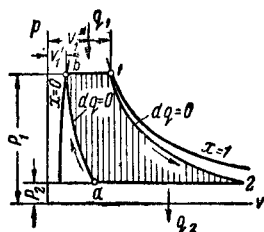
Решение вопросов, связанных с адиабатными процессами, по приведённым приближённым уравнениям следует заменять в тех случаях, когда это возможно, решением по тепловым диаграммам; не следует приведённые показатели степеней в уравнениях адиабат понижать как отношение теплоёмкостей $\frac{c_p}{c_v}$.

КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ (ЦИКЛЫ)

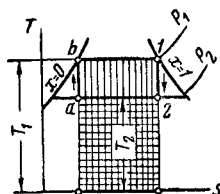
Цикл Карно. Фиг. 46 и 47 дают характер протекания цикла Карно для насыщенного пара. Подвод q_1 [ккал/кг] теплоты по изотерме $T_1 - (b-1)$ для насыщенного пара является одновременно процессом парообразования, идущим по изобаре p_1 ; отнятие теплоты q_2 [ккал/кг] по изотерме T_2 для насыщенного пара одновременно является изобарным сжатием $2-a$ при давлении p_2 , сопровождающимся значительным увлажнением пара

$$|q_2| = i_2 - i_a = r(x_2 - x_a);$$

$1-2$ и $a-b$ — адиабаты расширения и сжатия.



Фиг. 46



Фиг. 47

На диаграмме $T-s$ q_1 представлено площадью $c-b-1-d-c$, q_2 — площадью $c-a-2-d-c$; работа 1 кг пара в тепловых единицах $Al = q_1 - q_2$ представлена на диаграмме $T-s$ площадью $a-b-1-2-a$.

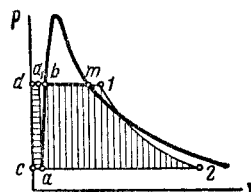
На диаграмме $p-v$ площадь $a-b-1-2-a$ даёт работу l [кгм/кг]. Термодинамический к. п. д. цикла $\eta_{it} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$.

Если предположить при протекании цикла Карно переход его в область перегрева (точки 1 и 2 расположатся за верхней пограничной кривой), то подвод теплоты по изотерме за верхней пограничной кривой уже не будет совпадать с изобарным процессом, а будет сопровождаться падением давления; наоборот, изотермическое отнятие теплоты (сжатие по изотерме T_2), начавшееся за верхней пограничной кривой, будет протекать с повышением давления до прихода в состояние

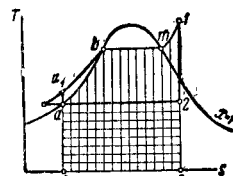
сухого насыщенного пара. Таким образом, переход цикла Карно в область перегрева, не изменяя его к. п. д. ($\eta_{it} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$), приводит к пароперегревателю и холодильнику,

работающим не при $p = \text{const}$, как в обычных установках, а при $t = \text{const}$, что усложняет их конструкцию.

Цикл Рэнкина — Клаузиуса. На фиг. 48 и 49 дан круговой процесс Рэнкина — Клаузиуса, состоящий из участка нижней погра-



Фиг. 48

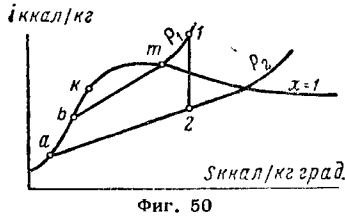


Фиг. 49

ничной кривой $a-b$, изобары $b-1$, адиабаты $1-2$ и изобары $2-a$. Установка, реализующая этот круговой процесс, должна бы включать элементы: насос-подогреватель для повышения давления воды от p_2 до p_1 с одновременным увеличением объёма её от v_2 до v_1 и повышением температуры от t_2 до t_1 (для осуществления процесса $a-b$, идущего по нижней пограничной кривой), котёл-испаритель (процесс $b-m$), перегреватель при постоянном давлении (процесс $m-1$), расширительная машина, поршневая или турбина (процесс $1-2$) и конденсатор (процесс $2-a$). В действительных установках питательный насос не выполняет роли подогревателя воды по нижней пограничной кривой, сжатие в нём может рассматриваться адиабатным ($a-a_1$). Однако для жидкости адиабатное сжатие не даёт сколько-нибудь ощутительного повышения температуры. Таким образом, по выходе из насоса нагнетаемая вода имеет температуру, практически равную исходной (в точке a_1 $t \approx t_2$, причём как результат адиабатного сжатия $\Delta t \approx 0,1-0,7^\circ\text{C}$); последующий по выходе из насоса подогрев воды до t_1 в точке b осуществляется или в экономайзере или в котле (участок изобары a_1-b). Круговой процесс, отвечающий этим условиям, определяется контуром $a-a_1-b-m-1-2-a$. Разница в затрате работы на насос-подогреватель и питательный насос (в котором практически адиабатное сжатие может расцениваться как изотермическое без изменения объёма) весьма мала, ощутима может быть только при высоких давлениях, близких к критическому состоянию.

Исходя из этих соображений, циклом идеальной паровой установки принимают круговой процесс Рэнкина — Клаузиуса. В диаграмме $t-s$ цикл Рэнкина — Клаузиуса дан на фиг. 50. По диаграмме $T-s$ затрачиваемое количество теплоты $q_1 \approx i_1 - i_a$ выражается площадью $c-a-b-m-1-e-c$; теплота, отдаваемая в конденсаторе, $q_2 = i_2 - i_a \approx i_2 - t_2$ ($t_2 = t_1$ — температура насы-

щенного пара по давлению p_2), представлена площадью $e-2-a-c-e$. Работа, совершаемая 1 кг пара, выраженная в тепловых единицах, $Al = q_1 - q_2 = i_1 - i_2$ ккал/кг (пло-



Фиг. 50

щадь $a-b-m-1-2-a$). Термодинамический к. п. д.

$$\eta_t = \frac{Al}{q_1} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_a} \approx \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2}.$$

Диаграмма $i-s$ позволяет проще всего найти характеристики цикла.

ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ

Дросселирование газов и паров происходит при прохождении потока через местное сопротивление (дроссель) в трубопроводе. При отсутствии теплообмена с окружающей средой и при условии пренебрежения разностью кинетических и потенциальных энергий перед и за дросселем процесс удовлетворяет требованию $i_1 = i_2$. Данное утверждение становится очевидным из рассмотрения уравнения первого начала для случая течения по каналу, выраженному через функцию энтальпии (см. стр. 527 первое начало).

При принятых допущениях дросселирование рассматривается как необратимый процесс, удовлетворяющий условию $i_1 = i_2$, что позволяет по диаграмме $i-s$ просто решать задачу нахождения параметров газа или пара в его конечном состоянии. Для решения задачи по диаграмме $i-s$ из начального состояния 1 проводится изохрала до пересечения её с кривой, характеризующей на диаграмме известный параметр конечного состояния. Точка пересечения даст состояние 2 и позволит прочесть по диаграмме остальные параметры этого состояния. Процессы дросселирования—необратимые процессы, так как они могут идти только в сторону падения давления ($p_2 < p_1$), и всегда характеризуются возрастанием энтропии. Возрастание энтропии в этом случае—свидетельство необратимости процесса, а не подвода теплоты, так как теплообмен со средой исключён из рассмотрения. (это оговорено выше). Аналитическое решение задачи сложнее, но и оно может исходить из условия $i_1 = i_2$. Дросселирование газа или пара приводит к падению давления, температуры (последнее лишь обычно) и увеличению удельного объёма. Для пара, в зависимости от исходного состояния перед дросселированием, результат последнего может вызывать либо увеличение, либо уменьшение сухости пара.

В процессе дросселирования $di = 0$, что даёт в этом случае

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i = \frac{AT \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - Av}{c_p}$$

(см. уравнение для di в независимых переменных T и p стр. 530).

Для газа, подчиняющегося уравнению состояния $Pv = RT$, числитель $AT \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - Av = 0$, т. е. в этом случае $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i = 0$ и,

следовательно, дросселирование идеального газа осуществляется без изменения его температуры.

Для реального газа возможны случаи:

$$1. \quad AT \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - Av > 0,$$

т. е.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i > 0 \text{ и } dT_{(i)} < 0 \text{ (так как } dp_{(i)} < 0)$$

—это так называемый положительный дроссель-эффект, дающий понижение температуры при дросселировании.

$$2. \quad AT \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - Av < 0,$$

т. е.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i < 0 \text{ и } dT_{(i)} > 0$$

(так как $dp_{(i)}$ всегда отрицательно), —это так называемый отрицательный дроссель-эффект, дающий повышение температуры при дросселировании.

$$3. \quad AT \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - Av = 0,$$

т. е.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i = 0 \text{ и } dT_{(i)} = 0,$$

—в этих состояниях реальный газ ведёт себя аналогично идеальному. Эти состояния называют точками инверсии, в них дроссель-эффект меняет знак.

Предположение, что реальный газ подчиняется приведённому уравнению состояния Ван-дер-Ваальса, даёт, что для точек инверсии приведённый объём и приведённая температура будут

$$\omega_i = \frac{3}{3 \pm \sqrt{9 - \pi_i}},$$

$$\tau_i = \frac{15}{4} \mp \sqrt{9 - \pi_i} - \frac{1}{12} \pi_i,$$

где π_i — приведённое давление в точке инверсии.

Исследование этих выражений показывает, что

1. При $\pi_i > 9$, ω_i и τ_i мнимы, т. е. при этих значениях давления точки инверсии не имеются.

2. При $\pi_i = 9$ имеется одна точка инверсии с $\omega_i = 1$ и $\tau_i = 3$.

3. При $\pi_i < 9$, ω_i и τ_i имеют по два значения, т. е. для каждого давления будет две точки инверсии.

ТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ ПО ТРУБАМ, ИСТЕЧЕНИЕ ИЗ РЕЗЕРВУАРОВ

ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Исходными уравнениями для анализа явлений течения газов и паров служат

$$1. \quad dq = dl + A \left(d \frac{w^2}{2g} + dh \right) + Adl_c$$

— уравнение первого начала термодинамики для течения сплошной среды по каналу (см. первое начало термодинамики стр. 527).

2. Для случая установившегося течения, когда в единицу времени через любое сечение трубы проходит неизменное по времени постоянное весовое количество среды, уравнение непрерывности будет

$$\frac{f_1 w_1}{v_1} = \frac{f_2 w_2}{v_2} = \frac{fw}{v} = \text{const или } \frac{dw}{v} = \frac{df}{f} + \frac{dw}{w},$$

где f, f_1, f_2 — сечения трубы в m^2 ; w, w_1, w_2 — скорости в $m/сек$; v, v_1, v_2 — удельные объёмы в $m^3/кг$.

3. Связь между объёмом, давлением и скоростью

$$-v dp = d \frac{w^2}{2g}.$$

При рассмотрении обычных случаев течения по трубам принимают его адиабатным ($dq = 0$), пренебрегают изменением внешней потенциальной энергии потока за счёт обычных малых перемещений по высоте центра тяжести его ($dh = 0$) и полагают работу dl_c равной нулю, считая стенки канала неподвижными. В этих условиях уравнение первого начала принимает вид:

$$Ad \frac{w^2}{2g} = -dl.$$

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ДВИЖУЩЕЙСЯ СРЕДЫ И СЕЧЕНИЕМ ТРУБЫ

1. Капельные жидкости ($v = \frac{1}{\gamma} = \text{const}$);

$f_1 w_1 = f_2 w_2, \frac{w_2^2}{2g} - \frac{w_1^2}{2g} = v(p_1 - p_2)$, т. е. увеличение скорости может иметь место лишь при падении давления и уменьшении сечения трубы в направлении движения жидкости.

2. Упругие жидкости (газы и пары). Течение при малых изменениях давления. Принимают соотношения для капельных жидкостей, т. е. пренебрегают изменением удельного объёма (веса), и считают

$$v = \frac{1}{\gamma} = \text{const}.$$

Приближённый подсчёт $\frac{w_2^2}{2g} - \frac{w_1^2}{2g}$ с заменой точного значения этой разности $(p - \Delta p) \int_p^{p-\Delta p} -v dp$ приближённым значением $v \cdot \Delta p$

(фиг. 51) приводит в предположении адиабатности расширения к относительной ошибке

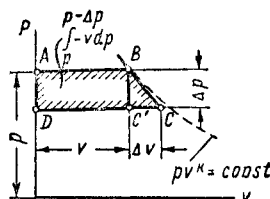
$$\delta = \frac{1}{v \cdot \Delta p} \left(\int_p^{p-\Delta p} -v dp - v \Delta p \right) = \frac{1}{2k} \cdot \frac{\Delta p}{p},$$

где k — показатель адиабаты.

Задаваясь значениями δ, k, p , определяют падение давления Δp , в пределах которого подсчёт по приближённой формуле допустим.

Течение при больших изменениях давления. Из уравнения непрерывности для упругой жидкости

$$f_2 = f_1 \frac{w_1 v_2}{w_2 v_1}.$$



Фиг. 51

Таким образом, ввиду переменности удельного объёма вопрос, будет ли сечение 2, взятое в направлении движения потока, больше или меньше исходного сечения 1, решается в зависимости от того, будет ли отношение $\frac{w_1 v_2}{w_2 v_1}$ больше или меньше единицы.

Дальнейшее исследование вопроса опирается на анализ уравнения непрерывности $\frac{df}{f} = \frac{dv}{v} - \frac{dw}{w}$, которое в сочетании с усло-

вием адиабатности течения $\frac{dp}{dv} = -k \frac{p}{v}$ и уравнением $\frac{dw^2}{2g} = -v dp$ приводится к виду:

$$\frac{df}{f} = \frac{gkp v - w^2}{k \cdot w^2} \cdot \frac{dp}{p}. \quad (I)$$

Скорость звука w_s в среде с давлением p и удельным объёмом v подсчитывается по выражению $w_s = \sqrt{gkp v}$; поэтому в приведённой выше формуле (I) $gkp v$ равно квадрату скорости звука, $w_s^2 = gkp v$.

Течение с ускорением

$$w_2 > w_1, \frac{dw^2}{2g} = -v dp,$$

т. е.

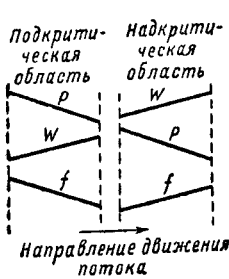
$$dp < 0 \text{ и } \frac{dp}{p} < 0.$$

Из уравнения (I) в этих условиях следует, что знак у $\frac{df}{f}$ определится тем, будет ли $gkp v$ больше или меньше w^2 ; при $gkp v > w^2$, что равносильно условию $w_s > w$, т. е. когда течение по трубе осуществляется со скоростью, меньшей скорости звука, $\frac{df}{f} < 0$; таким

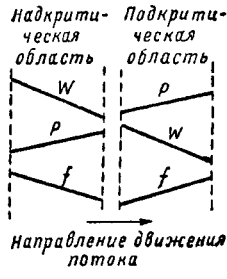
образом, в этом случае ускорение потока достигается за счёт уменьшения сечения трубы в направлении движения потока. Скорости w , меньшие скорости звука, называют подкритическими. При $gkpv < w^2$, что равносильно условию $w_s < w$, т. е. когда течение по трубе совершается со скоростью, большей скорости звука, $\frac{df}{f} > 0$; таким образом, при скоростях течения, превышающих скорость звука, ускорение потока достижимо при увеличении сечений трубы в направлении движения потока; скорости потока, превышающие скорость звука, называют надкритическими. Движение потока с ускорением, начавшееся с подкритической скоростью, может перейти в некоторых условиях в движение со скоростями надкритическими, пройдя через значение скорости потока

$$w_k = \sqrt{gkpv} = w_s,$$

где w_k — критическая скорость; при этом по уравнению (I) $\frac{df}{f} = 0$, — сечение трубы, в котором достигается критическая скорость, будет минимальным. Изменения p , f , w даются схемой фиг. 52.



Фиг. 52



Фиг. 53

Течение с замедлением

$$w_2 < w_1, \frac{dw^2}{2g} = -vdp,$$

т. е. мы должны иметь $dp > 0$ и $\frac{dp}{p} > 0$.

Уравнение (I) даёт: если $w^2 > gkpv$, т. е. $w > w_k = w_s$ (течение в надкритической области), то $\frac{df}{f} < 0$, — замедление потока до-

$$G = \frac{f_m \cdot w_m}{v_m} = f_m \sqrt{\frac{w_0^2}{v_0^2} \left(\frac{p_m}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} + 2g \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_0}{v_0} \left[\left(\frac{p_m}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_m}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad [\text{кг/сек}].$$

стигается при уменьшении сечений трубы в направлении движения потока; наоборот, при $w^2 < gkpv$, т. е. $w < w_k = w_s$ (в подкритической области), $\frac{df}{f} > 0$ — замедление потока вызывается увеличением сечений трубы. Переход из надкритической области в подкритическую может осуществиться в некоторых условиях в наименьшем сечении f_m , где по уравнению (I) $\frac{df}{f} = 0$ при $w = w_k = w_s$ (фиг. 53).

Наиболее общей задачей, охватывающей различные условия течения, является задача о течении по трубе переменного сечения с наличием в ней минимального сечения f_m .

Интегрируя уравнение $\frac{dw^2}{2g} = -vdp$ в предположении, что поток находится в адиабатных условиях (уравнение $pv^k = \text{const}$), обозначая величины, относящиеся к начальному сечению трубы, индексом 0, относящиеся к минимальному сечению, — индексом m , получаем скорость потока в минимальном сечении

$$w_m = \sqrt{w_0^2 + 2g \frac{k}{k-1} p_0 v_0 \left[1 - \left(\frac{p_m}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad \text{м/сек.}$$

Условие для достижения скоростью критического значения

$$\beta_k = \frac{p_{m,k}}{p_0} = \left(\frac{k-1}{k+1} \cdot \frac{w_0^2}{w_{s,0}^2} + \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

где $w_{s,0}$ — скорость звука в среде с параметрами p_0 и v_0 в начальном сечении

$$w_{s,0} = \sqrt{gk p_0 v_0}.$$

Критическая скорость в минимальном сечении

$$w_{m,k} = w_{s,m} = \sqrt{gk p_m v_{m,k}} = \sqrt{gk p_0 v_0 \beta_k^{\frac{k-1}{k}}}.$$

Степень сужения трубы при получении в минимальном сечении $f_{m,k}$ критической скорости

$$\frac{f_{m,k}}{f_0} = \frac{w_0}{w_{m,k}} \cdot \frac{v_{m,k}}{v_0} = \frac{w_0}{w_{s,0}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{k-1}{k+1} \cdot \frac{w_0^2}{w_{s,0}^2} + \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}.$$

Расход газа через сужающуюся трубу

Расход газа через сужающуюся трубу при достижении в сечении $f_{m,k}$ критической скорости $w_{m,k}$

$$G_k = \frac{f_{m,k} \cdot w_{m,k}}{v_{m,k}} = f_{m,k} \sqrt{gk p_0 \frac{1}{v_0} \left(\frac{k-1}{k+1} \cdot \frac{w_0^2}{w_{s,0}^2} + \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (\text{кг/сек}).$$

ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ ИЗ РЕЗЕРВУАРОВ НЕОГРАНИЧЕННОЙ И ОГРАНИЧЕННОЙ ЁМКОСТЕЙ

Все случаи истечения из ёмкостей, внутри которых, несмотря на истечение из них, не меняются параметры пара или газа, рассматриваются как случаи истечения из резервуара неограниченной ёмкости. Эти условия внутри резервуара могут достигаться путём той или иной компенсации расхода, например непрерывным парообразованием, идущим в котле.

Истечение, вызывающее изменение параметров среды внутри резервуара, именуется ниже истечением из резервуара ограниченной ёмкости.

Истечение из резервуара неограниченной ёмкости

Возможно предположить отсутствие теплообмена между истекающей средой и стенками, образующими короткий выходной канал, насадку, через которую осуществляется истечение.

Исходными уравнениями для определения скорости служат (см. выше течение газов и паров):

$$\frac{dw^2}{2g} = -v dp; \quad (1)$$

$$A \frac{dw^2}{2g} = -dI. \quad (2)$$

Уравнение (1) в сочетании с условием адиабатности истечения $p v^k = \text{const}$ и принятием начальной скорости $w_1 = 0$ и выходной скорости $w_2 = w$ даёт

$$w = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (3)$$

где подстрочным индексом 1 отмечены состояния внутри резервуара, а индексом 2 — состояния среды, в которую происходит истечение.

Уравнение 2 даёт

$$w = \sqrt{\frac{2g}{A} (I_1 - I_2)}. \quad (4)$$

Секундный расход, определяемый из условия $G = \frac{fw}{v_2}$, находится по формуле

$$G = f \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k+1}{k}} - \left(\frac{p_1}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \text{ кг/сек}, \quad (5)$$

где f [м²] — выходное сечение насадки.

Исследование приводит к двум случаям:

Истечение в подкритической области

Определяется условием

$$\beta_k < \beta = \frac{p_2}{p_1} < 1,$$

где p_2 — давление среды, в которую происходит истечение;

p_1 — давление среды, из которой происходит истечение;

β — отношение этих давлений;

β_k — критическое отношение давлений:

$$\beta_k = \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k}{k-1}}; \quad (6)$$

| | k | β_k |
|---|----------------|--|
| Для двухатомных газов | 1,4 | 0,528 |
| » перегретого пара | 1,3 | 0,546 |
| » сухого насыщ. пара | 1,135 | 0,577 |
| » влажного насыщ. пара с начальной степенью сухости x . . . | $k=1,035+0,1x$ | $\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$ |

приближённое выражение для β_k :

$\beta_k = 1,2555 - 0,65 \sqrt{k}$ (формула В. М. Тареева).

В рассматриваемом случае ($\beta_k < \beta < 1$) применимы для расчёта формулы (3) и (5); при одинаковых исходных условиях ($p_1 v_1$) по мере уменьшения β и приближения его значения к β_k w и G растут; при $\beta = \beta_k$ достигаются:

$$w = w_k = \sqrt{2g \frac{k}{k+1} p_1 v_1} \quad (7)$$

— критическая скорость истечения и

$$G = G_{\max} = f \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{2g \frac{k}{k+1} \frac{p_1}{v_1}} = f \sqrt{gk \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \frac{p_1}{v_1}} \quad (8)$$

— максимальный расход.

Для максимального расхода В. М. Тареев даёт приближённую формулу

$$G_{\max} = 1,914 \sqrt[3]{k} \cdot f \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}.$$

Коэффициенты в формулах (7) и (8) в зависимости от k принимают следующие значения:

| | k | $\sqrt{2g \frac{k}{k+1}}$ | $\sqrt{gk \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$ |
|---------------------------------------|-------|---------------------------|--|
| Для двухатомных газов | 1,4 | 3,38 | 2,145 |
| Для перегретого пара | 1,3 | 3,33 | 2,09 |
| Для сухого насыщенного пара | 1,135 | 3,23 | 1,99 |

Значение β_k может быть использовано в двух направлениях:

во-первых, если задано давление внутри резервуара p_1 и ставится вопрос, при каких давлениях окружающей среды условия истечения будут подкритическими, то из условия $\beta = \beta_k$ имеем

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_k = \beta_k \text{ и } p_{2,k} = p_1 \cdot \beta_k;$$

это значение $p_{2,k}$ определит максимальное значение давления окружающей среды, ограничивающее подкритические условия, т. е. возможные пределы p_2

$$p_{2,k} < p_2 < p_1;$$

во-вторых, если задано давление среды, в которую происходит истечение p_2 , и ставится вопрос о пределах p_1 , то из $\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_k = \beta_k$ имеем

$$p_1 = \frac{p_2}{\beta_k};$$

это значение p_1 определит его верхний предел для подкритических условий истечения, т. е. возможные пределы

$$p_2 < p_1 < \frac{p_2}{\beta_k}.$$

В случае истечения при небольшой разности давлений, определяемой условием $0,9 < \frac{p_2}{p_1} < 1$, можно пренебречь изменением удельного объема, что приводит к формулам

$$w = \sqrt{2g v (p_1 - p_2)} = \sqrt{2g \frac{p_1 - p_2}{\gamma}} \text{ [м/сек];}$$

$$G = f \sqrt{2g \frac{(p_1 - p_2)}{v}} =$$

$$= f \sqrt{2g \gamma (p_1 - p_2)} \text{ [кг/сек].}$$

Истечение в надкритической области

Определяется условием

$$0 < \beta = \frac{p_2}{p_1} < \beta_k.$$

При истечении через простую насадку в выходном сечении устанавливаются критическая скорость — см. формулу (7) и максимальный секундный расход — см. формулу (8). Давление в выходном сечении превышает давление окружающей среды и определяется из условия

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \beta_k,$$

т. е.

$$p_{2,k} = p_1 \beta_k;$$

выходная скорость в этом случае находится по уравнению

$$\frac{w_k^2 - w_1^2}{2g} = \int_{p_1}^{p_{2,k}} -v dp$$

($w_1 = 0$, как начальная скорость, отвечающая движению внутри резервуара), т. е. в

насадке совершается расширение лишь в пределах от p_1 до $p_{2,k}$, дальнейшее падение давления в струе (от $p_{2,k}$ до p_2) происходит уже по выходе из насадки, не используется для превращения потенциальной энергии $\left(\int_{p_{2,k}}^{p_1} -v dp\right)$ в кинетическую энергию струи, а затрачивается на потери при выходе.

Использование всей потенциальной энергии, отвечающей полному расширению газа от p_1 до p_2 , осуществляется в насадке Лавала, в которой за наименьшим сечением насадки идет расширяющаяся часть, создающая условия для превращения потенциальной энергии $\left(\int_{p_{2,k}}^{p_1} -v dp\right)$ в кинетическую.

Выходная скорость из насадки Лавала превышает критическую и при расчетном режиме находится из уравнения (3) по отношению давлений $\frac{p_2}{p_1}$ для полного перепада давлений (p_2 — давление окружающей среды, p_1 — давление в резервуаре).

Секундный расход подсчитывается по уравнению (8), где, однако, $f = f_{\min}$ — наименьшее сечение насадки, а не выходное; по выходной скорости ($w > w_k$) на основании сплошности потока расход может быть найден из выражения $G_{\max} = \frac{f_2 \cdot w}{v_2}$, где f_2 [м^2], w [м/сек], v_2 [$\text{м}^3/\text{кг}$] отнесены к выходному сечению.

Определение скорости истечения по разности энтальпий и по диаграмме $i-s$. При пользовании формулой (4)

$$w = \sqrt{\frac{2g}{A} (i_1 - i_2)} = 91,53 \sqrt{i_1 - i_2}$$

энтальпия i_1 берется по состоянию в резервуаре; энтальпия i_2 отвечает состоянию газа или пара в том сечении насадки, для которого ищется скорость.

Если определяется скорость выхода из насадки, то i_2 отвечает состоянию в выходном сечении (устье) насадки.

При истечении в подкритической области, когда $\beta_k < \frac{p_2}{p_1} < 1$, при простой насадке в устье ее устанавливается давление окружающей среды p_2 ; оно и определяет конец расширения и расчетное i_2 в формуле (4).

При истечении в надкритической области, когда $0 < \frac{p_2}{p_1} < \beta_k$, при простой насадке в устье ее достигается лишь давление $p_{2,k} = \beta_k \cdot p_1$; $p_{2,k} > p_2$, и именно оно ($p_{2,k}$) определяет конец расширения в насадке и расчетное i_2' для нахождения выходной скорости, которая в этих условиях равна критической

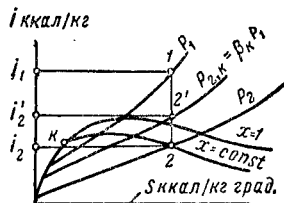
$$w = w_k = 91,53 \sqrt{i_1 - i_2'}.$$

При истечении в надкритической области через насадку Лаваля давление $p_{0,k} = \beta_k \cdot p_1$

создаётся в наименьшем сечении насадки; здесь скорость достигает критического значения w_k и определяется по энтальпии i_2' , отвечающей расширению до $p_{2,k}$,

$$w_k = 91,53 \sqrt{i_1 - i_2'};$$

в выходном сечении (устье расширяющейся части), давление будет равно p_2 , и оно определит конец расширения, расчётное значение i_2 и выходную скорость $w > w_k$ ($w =$



Фиг. 54

$= 91,53 \sqrt{i_1 - i_2}$). Фиг. 54 даёт схему определения расчётных i_2' и i_2 по диаграмме $i-s$ для пара.

Истечение из резервуара ограниченной ёмкости

В общем случае рассматривают задачу об истечении из резервуара, в котором за время истечения параметры начального состояния p_0, v_0, T_0 меняются, приобретая текущие значения p_i, v_i, T_i ; предполагают, что изменения состояния внутри резервуара подчинены условию $p_0 v_0^m = p_i v_i^m$ (v_0, v_i — удельные объёмы); при $m = 1$ — внутри резервуара изотермическое расширение, интенсивный подвод теплоты к массе газообразной среды резервуара; при $m = k$ — отсутствие теплообмена.

Ёмкость самого резервуара и выходное сечение переменны во времени: V_0 и V_i — начальный объём резервуара и его текущее значение в m^3 ; f_0 и f_i — выходное сечение начальное и его текущее значение в m^2 .

Основное дифференциальное уравнение, описывающее условия истечения из резервуара ограниченной, переменной ёмкости через переменное выходное сечение

$$\frac{1}{m} \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{-1} \cdot d \left(\frac{p_i}{p_0} \right) = - \frac{\mu \cdot \psi \cdot f}{V_i} \sqrt{p_0 v_0} \cdot \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{1}{2} - \frac{1}{2m}} \cdot dt - \frac{dV_i}{V_i}, \quad (9)$$

где

$$\psi = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_i} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_i} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}; \quad (10)$$

p_2 — давление среды, в которую происходит истечение; t — время в сек.

Истечение из резервуара ограниченной постоянной ёмкости V_0 через постоянное сечение F

Истечение в надкритической области. В этом случае

$$0 < \frac{p_2}{p_0} < \beta_k, \quad p_i > \frac{p_2}{\beta_k};$$

$$\psi = \psi_{\max} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{2g \frac{k}{k+1}} = \sqrt{gk \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}. \quad (11)$$

Уравнение (9) принимает вид:

$$\frac{1}{m} \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{1}{2m} - \frac{3}{2}} \cdot d \left(\frac{p_i}{p_0} \right) = - \mu \cdot \psi_{\max} \cdot \frac{F}{V_0} \sqrt{p_0 v_0} \cdot dt.$$

Время, потребное для понижения давления в резервуаре от начального p_0 до давления $p_i > \frac{p_2}{\beta_k}$

$$t = \frac{2}{m-1} \cdot \frac{V_0}{\mu \cdot \psi_{\max} \cdot F} \times \times \frac{1}{\sqrt{p_0 v_0}} \left[\left(\frac{p_0}{p_i} \right)^{\frac{m-1}{2m}} - 1 \right] \text{ сек.};$$

то же, но до давления $p_{i,k} = \frac{p_2}{\beta_k}$

$$t_k = \frac{2}{m-1} \cdot \frac{V_0}{\mu \cdot \psi_{\max} \cdot F} \cdot \frac{1}{\sqrt{p_0 v_0}} \times \times \left[\left(\frac{p_0}{p_2} \right)^{\frac{m-1}{2m}} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot \frac{m-1}{2m} - 1 \right].$$

При изменении параметров внутри резервуара по закону $p_i v_i = p_0 v_0$ ($m = 1$) время на истечение для понижения давления до

$p_i > \frac{p_2}{\beta_k}$

$$t = \frac{2,303}{\mu \cdot \psi_{\max} \cdot F} \cdot \frac{V_0}{\sqrt{p_0 v_0}} \cdot \lg \left(\frac{p_0}{p_i} \right).$$

Истечение в подкритической области. В этом случае

$$\beta_k < \frac{p_2}{p_0} < 1, \quad p_i < \frac{p_2}{\beta_k}.$$

Из уравнения (9) находим

$$dt = - \frac{1}{\mu m F \sqrt{p_0 v_0}} \cdot \frac{\left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{1}{2m} - \frac{3}{2}}}{\psi} \cdot d \left(\frac{p_i}{p_0} \right)$$

и время, необходимое для понижения давлений до p_i

$$t = \frac{1}{\mu F} \cdot \frac{V_0}{\sqrt{p_0 v_0}} \times \left(\frac{p_0}{p_2} \right)^{\frac{m-1}{2m}} \int_{p_0}^{p_i} \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_i} \right)^{\frac{m+1}{2m}} \cdot \psi} \cdot d \left(\frac{p_2}{p_i} \right).$$

Здесь ψ определяется уравнением (10). В общем случае

$$\int_{p_0}^{p_i} \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_i} \right)^{\frac{m+1}{2m}} \cdot \psi} \cdot d \left(\frac{p_2}{p_i} \right) \text{ находится графически,}$$

ски, при некоторых частных значениях m — аналитически [48].

При $0,9 < \frac{p_2}{p_0} < 1$, т. е. при истечении под влиянием малой разности давлений, с некоторыми допущениями и в предположении,

$$\begin{aligned} f dt &= -\frac{1}{m\mu} \cdot \frac{V_0}{\sqrt{p_0 v_0}} \cdot \frac{\left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{1}{2m} - \frac{3}{2}}}{\psi} \cdot d \left(\frac{p_i}{p_0} \right) = \frac{1}{m\mu} \cdot \frac{V_0}{\sqrt{p_0 v_0}} \cdot \left(\frac{p_0}{p_2} \right)^{\frac{m-1}{2m}} \frac{d \left(\frac{p_2}{p_i} \right)}{\left(\frac{p_2}{p_i} \right)^{\frac{m+1}{2m}} \cdot \psi}; \\ \int_{t_1}^{t_2} f dt &= \frac{1}{m\mu} \cdot \frac{V_0}{\sqrt{p_0 v_0}} \left(\frac{p_0}{p_2} \right)^{\frac{m-1}{2m}} \int_{p_2}^{p_i} \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_i} \right)^{\frac{m+1}{2m}} \cdot \psi} \cdot d \left(\frac{p_2}{p_i} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

что изменение параметров в резервуаре подчинено условию $p_i v_i = p_0 v_0$ ($m = 1$), время для понижения давления до p_i ($p_2 < p_i < p_0$)

$$t = \frac{2,303 V_0}{\mu F \sqrt{2g p_0 v_0}} \times \lg \left[\frac{\left(1 - \sqrt{1 - \frac{p_2}{p_i}} \right) \left(1 + \sqrt{1 - \frac{p_2}{p_0}} \right)}{\left(1 + \sqrt{1 - \frac{p_2}{p_i}} \right) \left(1 - \sqrt{1 - \frac{p_2}{p_0}} \right)} \right];$$

для полного выравнивания давления в резервуаре с давлением окружающей среды, т. е. при $p_i = p_2$,

$$t = \frac{2,303 V_0}{\mu F \sqrt{2g p_0 v_0}} \lg \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{p_2}{p_0}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{p_2}{p_0}}}.$$

Время на истечение, начавшееся в надкритической области и заканчивающееся в

подкритической области ($0 < \frac{p_2}{p_0} < \beta_k$, давление в резервуаре p_0 понижается до p_i , причём $\beta_k < \frac{p_2}{p_i} < 1$ или $p_i < \frac{p_2}{\beta_k}$, $p_{i,k} = \frac{p_2}{\beta_k}$),

находим путём суммирования времени на истечение в надкритической области при понижении давления в резервуаре до $p_{i,k} = \frac{p_2}{\beta_k}$ с временем для понижения давления в подкритической области от $p_{i,k}$ до p_i .

Истечение из резервуара ограниченной, переменной по времени ёмкости через переменное по времени выходное сечение

а) При истечении из резервуара постоянной ограниченной ёмкости (V_0) через переменное по времени сечение f фактором, определяющим падение давления в резервуаре, служит произведение $f \cdot dt$ — «время — сечение» [сек·м²]; для определения понижения давления от p_0 до p_i должен быть определён $\int_{t_1}^{t_2} f dt$ из уравнения (9)

Правая часть последнего уравнения отличается от таковой в уравнениях для нахождения времени, потребного на истечение в изложенных выше задачах при $F = \text{const}$, лишь отсутствием в ней постоянного множителя $\frac{1}{F}$. Исходя из этого, следует, что все найденные выше выражения для определения времени истечения t будут пригодны для нахождения время — сечение $\int_{t_1}^{t_2} f \cdot dt$, если в правую часть уравнений не вводить множитель $\frac{1}{F}$; при нахождении $\int_{t_1}^{t_2} f \cdot dt$ обла-

сти истечения должны учитываться согласно указаниям, данным выше. Закон изменения сечения по времени $f = \varphi(t)$ может быть задан или аналитически, или, как это бывает чаще, графически — кривой изменения сечения по времени, площадь под которой даёт время — сечение.

Сочетание закона $f = \varphi(t)$ и формул для $\int_{t_1}^{t_2} f \cdot dt$, вытекающих из уравнения (9), даёт решение вопроса о нахождении времени, необходимого для искомого понижения давления в резервуаре и обратно.

б) При истечении из резервуара ограниченной переменной по времени ёмкости через переменное по времени сечение фактором, определяющим понижение давления в резервуаре, служит уже $\frac{f \cdot dt}{V_i}$. Решение дифференциального уравнения (9) относительно

параметра как расчётного обычно заменяют приближённым решением, разбивая процесс на ряд элементов, внутри которых ёмкость резервуара принимают неизменной.

М. И. Жуковский рассматривает задачу нестационарного течения газа, относя её к случаям опорожнения и наполнения резервуаров конечных объёмов в предположении отсутствия ударных явлений [17].

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Теплопередача — обусловленная разностью температур передача теплоты от одного тела к другому или от одних частей тела к другим частям того же тела. Рассматривают теплопередачи: кондуктивную (кондукцию, теплопроводность), конвективную (конвекцию), радиационную (теплопередачу излучением, лучистую теплопередачу). Действительные процессы теплопередачи обычно сложны, в них все виды теплопередачи сопутствуют друг другу; расчёт таких сложных процессов упрощается путём изучения отдельных видов теплопередачи, отвлекаясь от других. Задачи теплопередачи могут охватывать области, где каждая точка характеризуется определённой температурой, остающейся неизменной во времени (стационарное температурное поле), и области, где каждая точка имеет температуру, меняющуюся по времени (нестационарное температурное поле): в первом случае — установившаяся (стационарная) теплопередача, во втором — неустановившаяся (нестационарная).

КОНДУКТИВНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА (КОНДУКЦИЯ, ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ)

Теплопередача, осуществляемая путём передачи энергии элементарными частицами вещества (электронами, атомами, молекулами), представляет собой результат микропроцессов обмена энергии между элементарными частицами, вступающими в соприкосновение друг с другом. В наиболее чистом виде кондуктивная теплопередача происходит в твёрдых телах, в жидкостях и газах реже и только в тонких слоях.

По гипотезе Фурье основное уравнение теплопроводности

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF \cdot d\tau;$$

здесь dQ — количество теплоты [ккал], передаваемое за элемент времени $d\tau$ [час] через элемент изотермической поверхности dF [м²] в направлении нормали к ней; $-\frac{\partial t}{\partial n}$ [град/м] = = grad — температурный градиент, векторная величина, равная производной от температуры по нормали к изотермической поверх-

ности в данной точке её и направленной в сторону возрастания температуры; $\lambda \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{град} \cdot \text{час}} \right]$ — коэффициент теплопроводности, количественная характеристика способности тел к осуществлению кондуктивной теплопередачи, численно равная количеству теплоты, передаваемому за 1 час через 1 м² изотермической поверхности (удельному тепловому потоку) при grad $t = 1$. Если элемент dF_1 не совпадает с изотермической поверхностью и нормаль s к dF_1 образует с нормалью n к изотермической поверхности угол φ , то

$$\begin{aligned} dQ &= -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot \cos \varphi \cdot dF_1 \cdot d\tau = \\ &= -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial s} \cdot dF_1 \cdot d\tau; \end{aligned}$$

при постоянном λ

$$Q = -\lambda \int_0^\tau \int_{(F_1)} \frac{\partial t}{\partial s} \cdot dF_1 \cdot d\tau;$$

при стационарном температурном поле $\frac{dt}{ds}$ не зависит от времени

$$Q = -\lambda \int_0^\tau d\tau \int_{(F_1)} \frac{\partial t}{\partial s} dF_1 = -\lambda \cdot \tau \int_{(F_1)} \frac{\partial t}{\partial s} dF_1.$$

Влияние температуры на λ

С ростом температуры λ чистых металлов обычно убывает (исключение алюминий), для них отношение λ к коэффициенту электропроводности приблизительно постоянно (закон Видемана — Франца) и пропорционально абсолютной температуре (закон Лоренца); присутствие посторонних примесей может сильно менять λ .

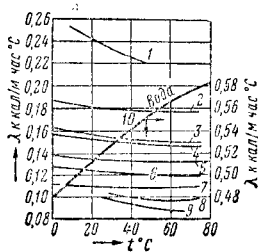
У теплоизоляционных материалов с повышением температуры λ обычно растёт (роль радиации поверхностей твёрдых составляющих теплоизолятора через внутренние воздушные прослойки).

Коэффициент теплопроводности жидкостей лежит в пределах:

$$\text{от } \lambda = 0,08 \text{ до } \lambda = 0,6 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}.$$

У многих жидкостей с повышением температуры λ убывает — см. фиг. 55, где даются значения λ некоторых жидкостей; на фиг. 55 кривая 1 даёт λ глицерина, 2 — метилового спирта, 3 — этилового спирта, 4 — ацетона, 5 — сероуглерода, 6 — толуола, 7 — пентана, 8 — этилбромид, 9 — четырёххлористого углерода, 10 — воды. У воды до 180°C λ растёт, при дальнейшем повышении — убывает; между 0 и 80°C

$$\lambda = 0,447 (1 + 0,003 t) \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}.$$



Фиг. 55

Для газов значения λ лежат в пределах

$$0,005 - 0,15 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}.$$

У газов с повышением температуры λ увеличивается. Для смеси газов коэффициент теплопроводности может быть определён путём опыта, закон аддитивности здесь неприменим.

Влияние давления на λ

При увеличении давления от 1 до 2000 ат отмечено у многих жидкостей повышение λ

на 11—15%. По кинетической теории, пока длина свободного пробега молекул мала по сравнению с толщиной газового слоя, λ не зависит от давления. При весьма малых давлениях (значительно увеличена длина свободного пробега) влияние давления тем сильнее, чем меньше толщина слоя. На λ паров влияние t и p велико.

Таблица 43

Коэффициент теплопроводности металлов

| Металлы и сплавы | Температура в °C | λ |
|---|------------------|-----------|
| Чистые металлы | | |
| Висмут | 18 | 7,0 |
| » | 100 | 5,8 |
| Вольфрам | 20 | 138 |
| Золото | 18 | 252 |
| » | 100 | 253 |
| Кадмий | 18 | 80 |
| » | 100 | 77,8 |
| Магний | 0—100 | 137 |
| Платина | 18 | 60 |
| » | 100 | 62,4 |
| Ртуть | 0 | 5,4 |
| » | 50 | 6,9 |
| Сурьма | 0 | 15,8 |
| » | 100 | 14,5 |
| Сплавы | | |
| Константан (60 Cu, 40 Ni) | 18 | 19,5 |
| Константан (60 Cu, 40 Ni) | 100 | 23,1 |
| Манганин (84 Cu, 4 Ni, 12 Mn) | 18 | 19,1 |
| | 100 | 22,6 |
| Сплавы никеля | | |
| 70 Ni, 28 Cu, 2 Fe | 20 | 30 |
| 62 Ni, 12 Cr, 26 Fe | 20 | 11,6 |
| Никелевое серебро | 0 | 25,2 |
| То же | 100 | 32 |
| Платиноид | 18 | 21,6 |
| Подшипниковый металл (белый) | 20 | 20,4 |

Таблица 42

Влияние температуры на коэффициент теплопроводности металлов и сплавов

(По данным «Международных справочных таблиц») [28] λ в $\frac{\text{ккал}}{\text{час} \cdot \text{м} \cdot \text{град}}$

| Металлы и сплавы | Температура t в °C | | | | | | | Точка плавления в °C |
|---|----------------------|------|------|------|------|------|------|----------------------|
| | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | |
| Алюминий | 174 | 177 | 197 | 234 | 274 | 319 | 364 | 649 |
| Латунь (90—10) | 88 | 101 | 115 | 128 | 143 | 155 | 168 | 1050 |
| » (70—30) | 91 | 94 | 95 | 93 | 100 | 103 | 104 | 940 |
| » (67—33) | 86 | 92 | 97 | 104 | 110 | 116 | 130 | 940 |
| » (60—40) | 91 | 103 | 118 | 131 | 145 | 160 | 172 | 894 |
| Медь (чистая) | 337 | 331 | 327 | 322 | 315 | 311 | 307 | 1080 |
| Никель | 50,6 | 50,3 | 49,2 | 48,9 | 47,8 | 47,5 | 46,2 | 1450 |
| Олово | 54 | 51 | 46 | — | — | — | — | 231 |
| Свинец | 29,8 | 29,5 | 28,3 | 27,4 | — | — | — | 345 |
| Серебро | 364 | 358 | 353 | 348 | 344 | 339 | 334 | 960 |
| Сталь (мягкая) | 54 | 49 | 45 | 40 | 36 | 31 | 27 | 1530 |
| Тантал (при 18°) | 47 | — | — | — | — | — | — | 2900 |
| Цинк | 97 | 92 | 88 | 84,5 | 80 | — | — | 419 |
| Чугун | 43 | 42 | 30 | 34 | 48 | 67 | 82 | 1200 |
| Чугун с высоким содержанием кремния | 45 | — | — | — | — | — | — | 1260 |

Таблица 44

Удельный вес, коэффициент теплопроводности, теплоёмкость и коэффициент температуропроводности различных материалов [32, 28]

Продолжение табл. 44

| Наименование материала | $\gamma \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | $t \text{ } ^\circ\text{C}$ | $\lambda \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ | $\epsilon \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ | $a \cdot 10^3 \frac{\text{м}^2}{\text{час}}$ |
|---|---------------------------------------|-----------------------------|---|--|--|
| Изоляционные, строительные и другие материалы | | | | | |
| Альфель | 20 | 50 | 0,140 | — | — |
| Асбест листовой | 770 | 30 | 0,16 | 0,195 | 0,712 |
| Асбест волокно . . | 470 | 50 | 0,085 | 0,195 | 1,04 |
| Асбестовый картон | 1 920 | 20 | 0,61 | — | — |
| Асбестовый шифер | 1 800 | 0 | 0,13 | — | — |
| Асбест | 1 800 | 60 | 0,17 | — | — |
| | 470 | -200 | 0,72 | — | — |
| | 470 | 0 | 0,134 | — | — |
| | 700 | -200 | 0,134 | — | — |
| | 700 | 0 | 0,2 | — | — |
| | 580 | 0 | 0,13 | — | — |
| | 580 | 50 | 0,14 | — | — |
| | 580 | 100 | 0,135 | — | — |
| | 580 | 150 | 0,174 | — | — |
| | 580 | 200 | 0,179 | — | — |
| | 580 | 250 | 0,182 | — | — |
| | 580 | 300 | 0,185 | — | — |
| | 580 | 400 | 0,192 | — | — |
| Асфальт | 2 110 | 20 | 0,60 | 0,50 | 0,57 |
| Бетон | 2 300 | 20 | 1,10 | 0,27 | 1,77 |
| Бумага | — | — | 0,112 | — | — |
| Вата хлопчатобумажная | 80 | 30 | 0,036 | — | — |
| Войлок волосяной (поперёк волокон) | 272 | 30 | 0,631 | — | — |
| То же шерстяной | 330 | 30 | 0,045 | — | — |
| Газовый уголь | — | 0—100 | 0,25 | — | — |
| Гипс | 1 650 | — | 0,25 | — | — |
| Глина огнеупорная | 1 845 | 450 | 0,89 | 0,26 | 1,855 |
| Гравий | 1 840 | 20 | 0,31 | — | — |
| Графит искусственный | — | 0 | 129 | — | — |
| То же порошкообразный (40 отверстий на линейный см) | — | 40 | 0,155 | — | — |
| Дерево (поперёк волокон): | | | | | |
| клён | 720 | 50 | 0,16 | — | — |
| ель | 450 | 60 | 0,093 | — | — |
| Дерево—дуб 1. волокнам | 800 | 20 | 0,178 | 0,42 | 0,53 |
| Дерево—дуб = волокнам | 800 | 20 | 0,312 | — | — |
| Дерево—сосна 1. волокнам | 448 | 20 | 0,092 | — | — |
| Дерево—сосна = волокнам | 448 | 20 | 0,22 | — | — |
| Древесные стружки | 140 | 30 | 0,05 | — | — |
| Доломит | 2 680 | 50 | 1,5 | — | — |
| Древесный уголь кусковой | 190 | 80 | 0,064 | — | — |
| | 240 | 80 | 0,076 | — | — |
| Земля сухая | 1 500 | — | 0,119 | — | — |
| » влажная | 1 700 | — | 0,565 | 0,43 | 0,693 |
| Зола древесная | — | 0—100 | 0,61 | — | — |
| Зонолит | 200 | 100 | 0,085 | — | — |
| Известняк (15,3% H ₂ O по объёму) | 1 50 | 24 | 0,8 | — | — |
| Каменный уголь | 1 400 | 20 | 0,16 | 0,312 | — |
| Картон гофрированный | — | — | 0,055 | — | — |
| Картон для перегородок, изоляционного типа | 237 | 21 | 0,042 | — | — |
| Картон для перегородок, плотная папка | 690 | 30 | 0,06 | — | — |

| Наименование материала | $\gamma \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | $t \text{ } ^\circ\text{C}$ | $\lambda \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ | $\epsilon \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ | $a \cdot 10^3 \frac{\text{м}^2}{\text{час}}$ |
|--|---------------------------------------|-----------------------------|---|--|--|
| Кварц кристаллический: | | | | | |
| ⊥ оси | 2 500—2 800 | 0 | 6,2 | 0,2 | 12,0 |
| = оси | 2 500—2 800 | 0 | 11,7 | — | — |
| Кирпич изоляционный | 550 | 100 | 0,12 | — | — |
| Кирпич строительный | 800—1 500 | 20 | 0,20—0,25 | — | — |
| Кирпич карбундовый | 1 000 | — | 9,7 | 0,162 | 6,0 |
| Кладка строительного кирпича | — | 20 | 0,6 | — | — |
| Кирпич шамотовый (обжиг 1330°) | — | 500 | 0,90 | — | — |
| | — | 800 | 0,92 | — | — |
| | — | 1 100 | 0,94 | — | — |
| | — | 500 | 0,95 | — | — |
| То же (обжиг 1410°) | — | 800 | 1,03 | — | — |
| | — | 1 100 | 1,06 | — | — |
| То же (обжиг 1450°) | — | 500 | 1,1 | — | — |
| | — | 800 | 1,13 | — | — |
| | — | 1 100 | 1,21 | — | — |
| Клинкер | 1 400 | 30 | 0,137 | — | — |
| Кожа подошвенная | 1 000 | — | 0,137 | — | — |
| Кокс порошкообразный | 449 | 100 | 0,164 | 0,29 | 0,126 |
| Копоть ламповая | 190 | 40 | 0,027 | — | — |
| Лава | — | — | 0,73 | — | — |
| Лёд | 920 | 0 | 1,95 | — | — |
| Линолеум | 1 180 | 20 | 0,16 | — | — |
| Магnezия 85% в порошке | 216 | 100 | 0,058 | — | — |
| Мел | 2 000 | 50 | 0,30 | 0,21 | 1,91 |
| Минеральная шерсть | 200 | 50 | 0,035 | 0,22 | 0,795 |
| Мрамор | 2 700 | 90 | 1,12 | 0,21 | 1,98 |
| Накипь котельная | — | 65 | 1,13—2,70 | — | — |
| Оксид магния (прессованный) | 800 | 20 | 0,43 | — | — |
| Опилки | 200 | 20 | 0,060 | — | — |
| Парафин | 920 | 20 | 0,23 | — | — |
| Пемза | — | 21—60 | 0,21 | — | — |
| Песчаник | 2 250 | 40 | 1,55 | — | — |
| Песок сухой | 1 500 | 20 | 0,23 | 0,19 | 9,85 |
| » влажный | 1 650 | 20 | 0,97 | 0,50 | 1,77 |
| Портланд-цемент | 1 900 | 50 | 0,26 | 0,27 | 0,506 |
| Пробковязи пластичная | 190 | 30 | 0,036 | 0,45 | 0,42 |
| Пробка гранулированная | 45 | 20 | 0,033 | — | — |
| Сахарный песок | 1 600 | 0 | 0,50 | 0,30 | 1,0 |
| Сера моноклиническая | — | 100 | 0,134—0,145 | — | — |
| То же ромбическая | — | 21 | 0,24 | — | — |
| То же строительная | 1 247 | 25 | 0,37 | — | — |
| Слюда (поперёк слоёв) | — | 50 | 0,50 | — | — |
| Слюда | 290 | — | 0,5 | 0,21 | 82,0 |
| Сланец | 2 800 | 100 | 1,23 | — | — |
| Снег | 360 | — | 0,40 | 0,50 | 1,43 |
| Совелит | 450 | 100 | 0,08 | — | — |
| Стекло | 2 500 | 20 | 0,64 | 0,16 | 1,6 |
| Стекло боросиликатного типа | 2 230 | 30—75 | 0,95 | — | — |
| Стекло оконное | — | — | 0,45—0,91 | — | — |
| Стекло натровоизвестковое | — | — | 0,45—0,65 | — | — |
| Стеклопанель | 200 | 0 | 0,032 | 0,16 | 1,0 |

Продолжение табл. 44

| Наименование материала | γ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | t $^{\circ}\text{C}$ | λ $\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ | ϵ $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ | $a \cdot 10^5$ $\frac{\text{м}^2}{\text{час}}$ |
|------------------------------------|--|--|---|--|--|
| Торфоплиты . . . | 220 | 50 | 0,055 | — | — |
| Углекислый магний | 3 040 | 21 | 0,06 | — | — |
| Фарфор | $\begin{cases} 2\,400 \\ 2\,400 \end{cases}$ | $\begin{cases} 95 \\ 1\,055 \end{cases}$ | $\begin{cases} 0,89 \\ 1,69 \end{cases}$ | 0,26 | 1,43 |
| Фибровый картон изоляционный | 237 | 21 | 0,042 | — | — |
| Фибра красная | 1 290 | 20 | 0,4 | — | — |
| Холст | — | 30 | 0,075 | — | — |
| Целлулоид | 1 400 | 30 | 0,18 | — | — |
| Целотекс | 215 | 20 | 0,04 | — | — |
| Шерсть минеральная | $\begin{cases} 150 \\ 315 \end{cases}$ | $\begin{cases} 30 \\ 30 \end{cases}$ | $\begin{cases} 0,0335 \\ 0,036 \end{cases}$ | — | — |
| То же животная | 110 | 30 | 0,031 | — | — |
| Шлак доменный | — | 24—127 | 0,095 | — | — |
| Шлаковая шерсть | 192 | 30 | 0,033 | — | — |
| Шлакобетон в куске | 2 150 | — | 0,80 | 0,21 | 1,78 |
| Шлаковая вата | 250 | 100 | 0,06 | — | — |
| Штукатурка искусственная | 2 110 | 21 | 0,64 | — | — |
| Эбонит | — | — | 0,15 | — | — |
| Эмаль силикатная | 610 | — | $\begin{cases} 0,75 \\ 1,1 \end{cases}$ | — | — |
| Металлы | | | | | |
| Бронза | 8 000 | 20 | 55,0 | 0,091 | 75,0 |
| Латунь | 8 000 | 0 | 73,5 | 0,090 | 02,0 |
| Никель | 8 600 | 20 | 50,0 | 0,11 | 53,0 |
| Олово | 7 230 | 0 | 55,0 | 0,054 | 141 |
| Свинец | 11 400 | 20 | 30,0 | 0,031 | 85 |
| Сталь | 7 900 | 20 | 39,0 | 0,11 | 45,0 |
| Цинк | 7 000 | 20 | 95,0 | 0,094 | 145,0 |
| Чугун | 7 220 | 20 | 54 | 0,12 | 62,5 |

Таблица 45

Коэффициенты теплопроводности изоляционных материалов при низких температурах

[28]

 λ в $\frac{\text{ккал}}{\text{час} \cdot \text{м} \cdot \text{град}}$

| Материал | Объёмный вес в $\text{кг}/\text{м}^3$ | Температура в $^{\circ}\text{C}$ | | | | |
|------------------|---------------------------------------|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0 | -45,5 | -73,3 | -129 | -184 |
| Асбест | 700 | 0,20 | 0,196 | 0,194 | 0,186 | 0,149 |
| То же | 465 | 0,1330 | 0,1280 | 0,1220 | 0,1072 | 0,0812 |
| Хлопок | 80 | 0,0434 | 0,0450 | 0,0411 | 0,0350 | 0,0295 |
| Шёлк | 100 | 0,0432 | 0,0381 | 0,0350 | 0,0292 | 0,0231 |

Дифференциальное уравнение теплопроводности

Предполагая, что: 1) поле температур нестационарно и заполнено однородным телом; 2) тело изотропно; 3) коэффициент теплопроводности λ , удельный вес γ и удельная теплоёмкость c не зависят от давления и температуры; 4) в теле не происходит изменений агрегатного состояния, получаем уравнение теплопроводности в виде линейного дифференциального уравнения 2-го порядка

в частных производных (независимые переменные — время τ и три пространственные координаты, зависящая переменная — температура t)

$$a \cdot \nabla^2 t = \frac{\partial t}{\partial \tau};$$

здесь $a = \frac{\lambda}{\gamma c_p}$ [$\text{м}^2/\text{час}$] — коэффициент теплопроводности, характеризующий быстроту выравнивания температур различных точек поля.

Для значения a , принимая размерность $\text{см}^2/\text{сек}$ вместо $\text{м}^2/\text{час}$, имеем

$$a [\text{м}^2/\text{час}] = a [\text{см}^2/\text{сек}] \cdot 2,778,$$

$\nabla^2 t$ — оператор Лапласа или дифференциальный параметр 2-го порядка от t .

Уравнение в развёрнутом виде:

1) в декартовых координатах

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right);$$

2) в цилиндрических координатах

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right);$$

3) в сферических координатах

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\cos \varphi}{r^2 \sin \varphi} \cdot \frac{\partial t}{\partial \varphi} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial \psi^2} \right),$$

где φ — долгота;

ψ — полярное расстояние (дополнительный угол к широте).

Кондукция (теплопроводность) в стационарном температурном поле

Температура в любой точке не претерпевает изменений по времени. Дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\nabla^2 t = 0 \quad \left(\text{так как } \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \text{ и } a \neq 0 \right).$$

Плоская стенка (одномерное стационарное температурное поле, $t=f(x)$, изотермические поверхности поля — плоскости, параллельные боковым поверхностям стенки). Стенка ограничена двумя изотермическими плоскостями с температурами $t_{w,1}$ и $t_{w,2}$ ($t_{w,1} > t_{w,2}$); практически стенка должна иметь ширину и высоту (направление осей y и z), достаточно большие по отношению к её толщине δ (направление оси x), чтобы можно было считаться с изменением температуры в стенке лишь в направлении оси x .

Температура в стенке (фиг. 56) $t=f(x)$ — прямая

$$\text{grad } t = \frac{t_{w,1} - t_{w,2}}{x_2 - x_1},$$

Таблица 46

Коэффициенты теплопроводности изоляционных материалов при средних температурах [28]

$$\lambda \text{ в } \frac{\text{ккал}}{\text{час} \cdot \text{м} \cdot \text{град}}$$

| Материал | Объёмный вес в кг/м³ | Температура в °С | | | | | | |
|--|----------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 3 | 38 | 93 | 149 | 204 | 316 | 427 |
| Асбест | 577 | 0,130 | 0,145 | 0,164 | 0,175 | 0,180 | 0,186 | 0,194 |
| Обожжённая инфузорная земля для покрытия трубопроводов | 200 | 0,064 | 0,063 | 0,077 | 0,085 | 0,092 | 0,109 | 0,127 |
| Изоляционный состав (рыхлый) | 400 | 0,060 | 0,068 | 0,075 | 0,079 | 0,082 | — | — |
| Хлопок | 80 | 0,048 | 0,052 | 0,058 | — | — | — | — |
| Шёлковая нить | 146 | 0,039 | 0,045 | 0,050 | — | — | — | — |
| Шёлк | 100 | 0,037 | 0,042 | 0,050 | — | — | — | — |
| Шерсть | 136 | 0,033 | 0,040 | 0,049 | — | — | — | — |
| Пробковый порошок | 163 | 0,031 | 0,039 | 0,048 | — | — | — | — |
| Инфузорная земля (рыхлая) | 350 | 0,052 | 0,058 | 0,067 | 0,070 | 0,075 | 0,079 | — |

Таблица 47

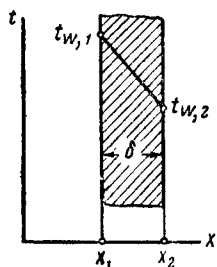
Коэффициенты теплопроводности изоляционных материалов при высоких температурах [28]

$$\lambda \text{ в } \frac{\text{ккал}}{\text{час} \cdot \text{м} \cdot \text{град}}$$

| Материал | До какой температуры в °С | Средняя температура в °С | | | | | | | | | |
|---|---------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 38 | 93 | 149 | 204 | 260 | 316 | 371 | 427 | 482 | 538 |
| Слоёный асбестовый войлок (около 40 слоёв на 25 мм) | 370 | 0,049 | 0,055 | 0,06 | 0,065 | 0,071 | — | — | — | — | — |
| То же (около 20 слоёв на 25 мм) | 260 | 0,067 | 0,075 | 0,082 | 0,090 | 0,097 | — | — | — | — | — |
| Волнистый асбест (4 складки на 25 мм) | 150 | 0,075 | 0,086 | 0,103 | — | — | — | — | — | — | — |
| 85%-ная магнезия | 315 | 0,058 | 0,061 | 0,064 | 0,069 | — | — | — | — | — | — |
| Диатомит с асбестом и связующим материалом | 870 | 0,067 | 0,070 | 0,073 | 0,075 | 0,079 | 0,082 | 0,090 | 0,097 | — | — |
| Диатомитовый кирпич | 870 | 0,080 | 0,083 | 0,086 | 0,090 | 0,094 | 0,097 | 0,103 | 0,109 | — | — |
| | 1 100 | 0,189 | 0,194 | 0,198 | 0,204 | 0,208 | 0,213 | 0,223 | 0,235 | 0,262 | — |
| | 1 370 | 0,191 | 0,195 | 0,201 | 0,207 | 0,213 | 0,221 | 0,231 | 0,243 | 0,273 | 0,303 |
| Диатомит порошкообразный (объёмный вес 290 кг/м³) | — | 0,058 | 0,062 | 0,066 | 0,071 | 0,076 | 0,080 | 0,091 | 0,101 | — | — |
| Горный лён (rock wool) | — | 0,045 | 0,050 | 0,058 | 0,066 | 0,075 | 0,085 | — | — | — | — |

$$t = t_{w,1} - \frac{t_{w,1} - t_{w,2}}{\delta} (x - x_1)$$

Количество теплоты, передаваемое через стенку на участке поверхности F



Фиг. 56

$$Q = \lambda F \frac{t_{w,1} - t_{w,2}}{\delta} [\text{ккал/час}],$$

где λ коэффициент теплопроводности в ккал/м·град·час, F в м², δ в м.

Плоская многослойная стенка, состоящая из n плотно прилегающих друг к другу слоёв, с коэффициентами теплопроводности и толщинами λ_1 и δ_1 , λ_2 и δ_2 , ..., λ_n и δ_n . Наружные плоскости стенки имеют температуры $t_{w,1}$ и $t_{w,n+1}$; температуры в плоскостях стыка смежных слоёв $t_{w,2}$, $t_{w,3}$, ..., $t_{w,n}$; в i -м слое

$$(\text{grad } t)_i = \left(- \frac{t_{w,i+1} - t_{w,i}}{x_{i+1} - x_i} \right) = \frac{t_{w,i} - t_{w,i+1}}{\delta_i};$$

распределение температуры в i -м слое, — $t_i = f(x)$ — прямая;

$$x_{w,i} < x < x_{w,i+1},$$

$$t_i = t_{w,i} - \frac{t_{w,i} - t_{w,i+1}}{\delta_i} \cdot (x - x_{w,i}).$$

Распределение температур в стенке $t = f(x)$ — ломаная линия, проходящая через температуры $t_{w,1}$, $t_{w,2}$, ..., $t_{w,n+1}$.

Количество теплоты, передаваемое через стенку на участке поверхности $F [м^2]$ (фиг. 57)

$$Q = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \cdot F (t_{w,1} - t_{w,n+1}) \text{ [ккал/час];}$$

Таблица 48

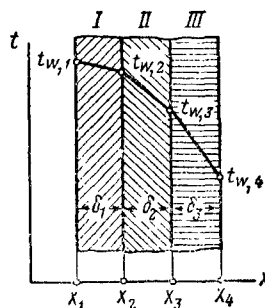
Коэффициенты теплопроводности жидкостей λ в $\frac{\text{ккал}}{\text{час} \cdot \text{м} \cdot \text{град}}$ [28] *

| Жидкость | Температура в °С | λ |
|--|------------------|-----------|
| Уксусная кислота 100%-ная | 0 | 0,183 |
| То же 50%-ная | 50 | 0,127 |
| То же 50%-ная | 0 | 0,271 |
| Ацетон | 80 | 0,384 |
| Ацетон | 0 | 0,158 |
| Аммиак 26%-ный | 100 | 0,137 |
| Аммиак 26%-ный | 0 | 0,360 |
| Аммиак 26%-ный | 80 | 0,474 |
| Аммиак 26%-ный | 0 | 0,119 |
| Аммиак 26%-ный | 50 | 0,075 |
| Аммиак 26%-ный | 0 | 0,128 |
| Аммиак 26%-ный | 100 | 0,124 |
| Аммиак 26%-ный | 0 | 0,156 |
| Аммиак 26%-ный | 100 | 0,153 |
| Бутиловый алкоголь (п) | 0 | 0,145 |
| То же (iso) | 100 | 0,133 |
| То же (iso) | 0 | 0,145 |
| То же (iso) | 80 | 0,133 |
| Этиленгликоль | 0 | 0,230 |
| Этиленгликоль | 12 | 0,1255 |
| Этиленгликоль | 45 | 0,106 |
| Серовуглерод | 0 | 0,145 |
| Серовуглерод | 80 | 0,144 |
| Четырёххлористый углерод | 10 | 0,104 |
| Четырёххлористый углерод | 70 | 0,86 |
| Касторовое масло | 4 | 0,154 |
| Хлорбензол | 12 | 0,1185 |
| Хлороформ | 9—15 | 0,104 |
| Цимол (p) | 30 | 0,117 |
| Цимол (p) | 60 | 0,118 |
| Иодистый этил | 0 | 0,0955 |
| Иодистый этил | 80 | 0,0925 |
| Иодистый этил | 0 | 0,243 |
| Глицерин 100%-ный | 50 | 0,250 |
| Глицерин 100%-ный | 0 | 0,335 |
| То же 50%-ный | 50 | 0,405 |
| Гептан | Ок. 4 | 0,1215 |
| Гексан (п) | 30 | 0,119 |
| Гексан (п) | 60 | 0,118 |
| Хлористоводородная кислота 30%-ная | 20 | 0,363 |
| Хлористоводородная кислота 30%-ная | 60 | 0,420 |
| Изопропиловый алкоголь | 30 | 0,137 |
| Изопропиловый алкоголь | 60 | 0,135 |
| Этиловый спирт 100%-ный | 0 | 0,160 |
| То же 90%-ный | 80 | 0,150 |
| То же 90%-ный | 0 | 0,137 |
| То же 90%-ный | 80 | 0,250 |
| Этиловый спирт 80%-ный | 0 | 0,164 |
| » 80%-ный | 80 | 0,275 |
| » 70%-ный | 0 | 0,185 |
| » 60%-ный | 80 | 0,293 |
| » 60%-ный | 0 | 0,216 |
| » 50%-ный | 80 | 0,323 |
| » 50%-ный | 0 | 0,252 |
| » 40%-ный | 80 | 0,364 |
| » 40%-ный | 0 | 0,300 |
| » 40%-ный | 80 | 0,415 |
| Морская вода 0% твёрдых веществ | -20 | 0,447 |
| Морская вода 0% твёрдых веществ | 80 | 0,590 |
| То же 1% твёрдых веществ | -20 | 0,433 |
| То же 1% твёрдых веществ | 80 | 0,575 |
| То же 2% твёрдых веществ | -20 | 0,430 |
| То же 2% твёрдых веществ | 80 | 0,566 |
| То же 3% твёрдых веществ | -20 | 0,427 |
| То же 3% твёрдых веществ | 80 | 0,564 |
| То же 3,5% твёрдых веществ | -20 | 0,425 |
| То же 3,5% твёрдых веществ | 80 | 0,562 |
| Рассол 25%-ный CaCl ₂ | -20 | 0,405 |
| Рассол 25%-ный CaCl ₂ | 80 | 0,544 |

Продолжение табл. 48

| Жидкость | Температура в °С | λ |
|-------------------------------------|------------------|-----------|
| Рассол 25%-ный NaCl | -20 | 0,334 |
| » 30%-ный | 80 | 0,476 |
| » 30%-ный | 0 | 0,345 |
| » 20%-ный | 80 | 0,453 |
| » 20%-ный | 0 | 0,385 |
| » 10%-ный | 80 | 0,493 |
| » 10%-ный | 0 | 0,434 |
| » 10%-ный | 80 | 0,547 |
| Бромистый этил | 0 | 0,106 |
| Бромистый этил | 80 | 0,0978 |
| Этиловый эфир | 0 | 0,1190 |
| Этиловый эфир | 80 | 0,1155 |
| Оливковое масло | 39 | 0,150 |
| Терпентинное масло | 39 | 0,109 |
| Пентан (п) | 0 | 0,119 |
| Пентан (п) | 80 | 0,110 |
| Нефтяной эфир | 0 | 0,113 |
| Нефтяной эфир | 80 | 0,109 |
| Керосин | 20 | 0,130 |
| Керосин | 80 | 0,1185 |
| Ртуть | 100 | 7,2 |
| Серная кислота 111%-ная | 20 | 0,147 |
| » 98%-ная | 60 | 0,274 |
| » 98%-ная | 20 | 0,231 |
| » 60%-ная | 60 | 0,243 |
| » 60%-ная | 20 | 0,140 |
| Метиловый спирт | 60 | 0,161 |
| Метиловый спирт | 0 | 0,194 |
| То же 40%-ный | 80 | 0,175 |
| То же 40%-ный | 10 | 0,28 |
| То же 40%-ный | 80 | 0,31 |
| Нефтяное масло | Ок. 15 | 0,12 |
| Пропиловый алкоголь (iso) | 0 | 0,1325 |
| Пропиловый алкоголь (iso) | 80 | 0,135 |
| Октан | 30 | 0,130 |
| Октан | 60 | 0,127 |
| Касторовое масло | 39 | 0,155 |
| Толуол | 0 | 0,142 |
| Толуол | 100 | 0,1215 |
| Вазелин | 20 | 0,188 |
| Вазелин | 0 | 0,124 |
| Ксилол | 40 | 0,143 |

$r_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i} \left[\frac{\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{час}}{\text{ккал}} \right]$ — сопротивление кондукции i -го слоя.



Фиг. 57

При стационарном температурном поле количества теплоты, проходящие через каждый слой Q_i , равны между собой и равны

* Допускается линейная интерполяция величины по температуре. Оба приведенные в таблице значения температуры представляют вместе с тем для приводимых данных рекомендуемые пределы. Составы приведены в процентах по весу.

Т а б л и ц а 49
Тепловые параметры различных жидкостей [33]

| Наименование жидкости | $\gamma \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | $t \text{ } ^\circ\text{C}$ | $\lambda \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ | $\epsilon \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ | $\alpha \cdot 10^5 \frac{\text{м}^2}{\text{час}}$ |
|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|---|--|---|
| Аммиак | 617 | 20 | 0,49 | 1,13 | 0,703 |
| | 665 | -32 | 0,48 | 1,10 | 0,656 |
| Бензин | 900 | 0 | 0,125 | 0,43 | 0,323 |
| | 900 | 50 | 0,095 | 0,44 | 0,24 |
| Бензол | 900 | 5 | 0,12 | 0,40 | 0,30 |
| | — | 30 | 0,137 | — | — |
| | — | 60 | 0,130 | — | — |
| Глицерин | 1 260 | 20 | 0,25 | 0,53 | 0,342 |
| Керосин | — | 30 | 0,129 | — | — |
| | — | 75 | 0,120 | — | — |
| | 750 | 80 | 0,12 | 0,56 | 2,85 |
| | — | 27 | 0,117 | — | — |
| Крекинг-мазут | — | 47 | 0,115 | — | — |
| (Грозненского за- вода) | — | 32 | 0,102 | — | — |
| Мазут А | — | 65 | 0,099 | — | — |
| Нефтяное масло | 890 | 200 | 0,089 | 0,58 | 0,173 |
| Смола | 1 200 | 80 | 0,12 | — | — |

Т а б л и ц а 50
Коэффициент теплопроводности воды
 $\lambda \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}} [7]$

| $t \text{ } ^\circ\text{C}$ | $\lambda \text{ нас.}$ | $P \text{ в } \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ | | | |
|-----------------------------|------------------------|--|-------|-------|-------|
| | | 100 | 200 | 300 | 400 |
| 0 | 0,474 | 0,477 | 0,480 | 0,484 | 0,488 |
| 10 | 0,494 | 0,498 | 0,502 | 0,507 | 0,512 |
| 20 | 0,515 | 0,519 | 0,523 | 0,528 | 0,533 |
| 30 | 0,531 | 0,535 | 0,540 | 0,545 | 0,550 |
| 40 | 0,545 | 0,549 | 0,554 | 0,559 | 0,564 |
| 50 | 0,557 | 0,561 | 0,565 | 0,570 | 0,575 |
| 60 | 0,567 | 0,571 | 0,575 | 0,580 | 0,585 |
| 70 | 0,574 | 0,578 | 0,583 | 0,588 | 0,593 |
| 80 | 0,580 | 0,584 | 0,589 | 0,594 | 0,599 |
| 90 | 0,585 | 0,589 | 0,594 | 0,599 | 0,604 |
| 100 | 0,587 | 0,593 | 0,598 | 0,603 | 0,608 |
| 110 | 0,589 | 0,595 | 0,600 | 0,605 | 0,612 |
| 120 | 0,590 | 0,596 | 0,602 | 0,608 | 0,614 |
| 130 | 0,590 | 0,596 | 0,602 | 0,609 | 0,614 |
| 140 | 0,589 | 0,596 | 0,602 | 0,608 | 0,615 |
| 150 | 0,588 | 0,596 | 0,601 | 0,608 | 0,615 |
| 160 | 0,587 | 0,593 | 0,599 | 0,606 | 0,613 |
| 170 | 0,584 | 0,591 | 0,597 | 0,603 | 0,611 |
| 180 | 0,580 | 0,587 | 0,593 | 0,600 | 0,609 |
| 190 | 0,576 | 0,583 | 0,589 | 0,597 | 0,606 |
| 200 | 0,570 | 0,578 | 0,584 | 0,593 | 0,602 |
| 210 | 0,563 | 0,572 | 0,580 | 0,587 | 0,597 |
| 220 | 0,555 | 0,564 | 0,572 | 0,582 | 0,591 |
| 230 | 0,548 | 0,556 | 0,565 | 0,574 | 0,583 |
| 240 | 0,540 | 0,547 | 0,557 | 0,567 | 0,577 |
| 250 | 0,531 | 0,537 | 0,547 | 0,557 | 0,567 |
| 260 | 0,520 | 0,526 | 0,536 | 0,547 | 0,558 |
| 270 | 0,507 | 0,514 | 0,526 | 0,537 | 0,549 |
| 280 | 0,494 | 0,500 | 0,512 | 0,526 | 0,538 |
| 290 | 0,480 | 0,484 | 0,497 | 0,513 | 0,527 |
| 300 | 0,464 | 0,466 | 0,482 | 0,499 | 0,513 |
| 310 | 0,446 | — | 0,464 | 0,482 | 0,499 |
| 320 | 0,425 | — | 0,444 | 0,463 | 0,482 |
| 330 | 0,402 | — | 0,420 | 0,443 | 0,466 |
| 340 | 0,376 | — | 0,392 | 0,422 | 0,447 |
| 350 | 0,344 | — | 0,359 | 0,395 | 0,425 |
| 360 | 0,306 | — | 0,314 | 0,364 | 0,401 |
| 370 | 0,252 | — | — | 0,326 | 0,376 |

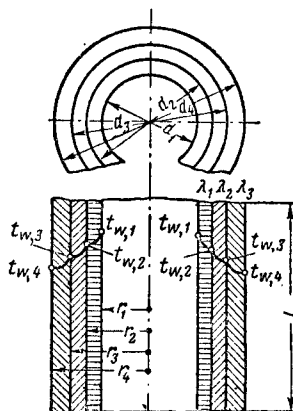
количеству теплоты, проходящему через всю стенку Q ,

$$Q_i = \lambda_i \cdot F \frac{(t_{w,i} - t_{w,i+1})}{\delta_i} \quad [\text{ккал/час}],$$

$$Q_i = Q;$$

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{Q_i}{F} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \cdot (t_{w,1} - t_{w,n+1}) = \frac{\lambda_i}{\delta_i} (t_{w,i} - t_{w,i+1}).$$

Температура на стыке i -го и $(i+1)$ -го слоёв



Фиг. 58

$$t_{w,i+1} = t_{w,i} - q \frac{\delta_i}{\lambda_i};$$

также

$$t_{w,i+1} = t_{w,1} - q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right).$$

Круглая цилиндрическая стенка (труба). Стенка, стационарное температурное поле которой характеризуется изотермическими поверхностями круговых цилиндров, имеющих общую ось, состоит из n слоёв; внутренняя изотермическая поверхность радиуса r_1 имеет температуру $t_{w,1}$, внешняя поверхность радиуса r_{n+1} — $t_{w,n+1}$; коэффициенты теплопроводности слоёв $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$; на участке длины L утечки теплоты в направлении к торцам трубы не учитываются, поле температур одномерно, — $t = f(r)$.

На участке длины L [м] (фиг. 58) трубы количество теплоты, передаваемое в час

$$Q = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \cdot \pi L (t_{w,1} - t_{w,n+1}) \quad [\text{ккал/час}],$$

где i — порядковый номер слоя (на фиг. 58).

Количества теплоты Q_i на участке длины L (м) трубы, передаваемые отдельными слоями, при стационарном температурном поле равны между собой и равны Q .

$$Q_i = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \cdot \pi L (t_{w,i} - t_{w,i+1});$$

$$Q_i = Q.$$

Таблица 51
Коэффициент теплопроводности водяного пара [7]
 $\lambda 10^4 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$

| $t^\circ \text{C}$ | $\lambda_{\text{нас.}}$ | в $P \text{ кг/см}^2$ | | | | | | | | | |
|--------------------|-------------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| | | 1 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| 100 | 208 | 208 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 150 | 285 | 244 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 200 | 370 | 284 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 250 | 475 | 326 | 395 | 475 | — | — | — | — | — | — | — |
| 300 | 605 | 368 | 408 | 440 | 500 | — | — | — | — | — | — |
| 350 | 910 | 416 | 436 | 456 | 482 | 517 | 570 | 780 | — | — | — |
| 400 | — | 467 | 490 | 508 | 538 | 560 | 586 | 670 | 850 | 1 250 | — |
| 450 | — | 548 | 565 | 584 | 605 | 622 | 640 | 680 | 783 | 930 | 1 200 |
| 500 | — | 652 | 668 | 685 | 702 | 715 | 728 | 750 | 805 | 867 | 1 000 |
| 550 | — | 774 | 790 | 802 | 815 | 828 | 830 | 850 | 880 | 904 | 970 |

Таблица 52
Значения динамической и кинематической вязкости воды и водяного пара на кривой насыщения [7]

| Температура $t^\circ \text{C}$ | Давление насыщения P_s в кг/см^2 | Вода | | П а р | |
|--------------------------------|---|---|---|---|---|
| | | Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{сек} / \text{м}^2$ | Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^3 \text{ м}^2 / \text{сек}$ | Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{сек} / \text{м}^2$ | Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^3 \text{ м}^2 / \text{сек}$ |
| 150 | 4,8 | 18,9 | 0,202 | 1,50 | 5,76 |
| 160 | 6,3 | 17,7 | 0,191 | 1,55 | 4,67 |
| 170 | 8,1 | 16,6 | 0,181 | 1,61 | 3,83 |
| 180 | 10,2 | 15,6 | 0,173 | 1,67 | 3,18 |
| 190 | 12,8 | 14,8 | 0,166 | 1,72 | 2,64 |
| 200 | 15,9 | 14,1 | 0,160 | 1,77 | 2,21 |
| 210 | 19,5 | 13,4 | 0,154 | 1,82 | 1,86 |
| 220 | 23,7 | 12,8 | 0,149 | 1,87 | 1,58 |
| 230 | 28,5 | 12,2 | 0,145 | 1,92 | 1,35 |
| 240 | 34,1 | 11,7 | 0,141 | 1,98 | 1,16 |
| 250 | 40,6 | 11,2 | 0,137 | 2,03 | 0,997 |
| 260 | 47,9 | 10,8 | 0,135 | 2,09 | 0,864 |
| 270 | 56,1 | 10,4 | 0,133 | 2,15 | 0,750 |
| 280 | 65,5 | 10,0 | 0,131 | 2,22 | 0,654 |
| 290 | 75,9 | 9,6 | 0,129 | 2,28 | 0,571 |
| 300 | 87,6 | 9,3 | 0,128 | 2,35 | 0,499 |
| 310 | 100,6 | 9,0 | 0,128 | 2,42 | 0,435 |
| 320 | 115,1 | 8,7 | 0,128 | 2,50 | 0,379 |
| 330 | 131,2 | 8,3 | 0,127 | 2,59 | 0,329 |
| 340 | 149,0 | 7,9 | 0,127 | 2,70 | 0,284 |
| 350 | 168,6 | 7,4 | 0,127 | 2,84 | 0,245 |
| 360 | 190,4 | 6,8 | 0,127 | 3,03 | 0,207 |
| 370 | 214,7 | 5,8 | 0,127 | 3,36 | 0,163 |

Количество теплоты, передаваемое 1 пог. м трубы

$$q_i = \frac{Q}{L} = \frac{Q_i}{L} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \cdot \pi (t_{w,1} - t_{w,n+1}) = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \cdot \pi (t_{w,i} - t_{w,i+1}) \text{ [ккал/м.час]}.$$

Количество теплоты, передаваемое 1 м² поверхности трубы, считая по внутреннему диаметру, $q^{*} = \frac{Q}{\pi d_1 L}$; то же, но по наружному

диаметру, $q^{*} = \frac{Q}{\pi d_{n+1} \cdot L}$, т. е. $q = q^{*} \pi d_1 = q^{*} \pi d_{n+1}$.

Температура $t_{w,i+1}$ на стыке i -го и $(i+1)$ -го слоёв

$$t_{w,i+1} = t_{w,i} - \frac{1}{2\pi\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \cdot q,$$

а также

$$t_{w,i+1} = t_{w,1} - \sum_{i=1}^{i=i} \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \cdot q.$$

Температура внутри i -го слоя $t_i = f(d)$, где $d_i < d < d_{i+1}$,

$$t_i = \frac{t_{w,i} \ln \frac{d_{i+1}}{d} + t_{w,i+1} \ln \frac{d}{d_i}}{\ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}.$$

Для однослойной трубы

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot \pi \cdot L (t_{w,1} - t_{w,2}).$$

Таблица 53
Физические параметры для сухого воздуха при $P = 1 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} [33]$

| $t^\circ \text{C}$ | $\gamma \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | $c_p \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ | $\nu \frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$ | $\alpha \frac{\text{м}^2}{\text{час}}$ | $\mu \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}$ | $\nu \frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$ | Pr |
|--------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|--|---|-------------------------------------|-------|
| —180 | 3,685 | 0,250 | 0,65 | 0,705 | 0,66 | 1,76 | 0,900 |
| —150 | 2,817 | 0,248 | 1,00 | 1,45 | 0,89 | 3,10 | 0,770 |
| —100 | 1,984 | 0,244 | 1,39 | 2,88 | 1,20 | 5,94 | 0,742 |
| —50 | 1,534 | 0,242 | 1,75 | 4,73 | 1,49 | 9,54 | 0,726 |
| —20 | 1,365 | 0,241 | 1,94 | 5,94 | 1,66 | 11,93 | 0,724 |
| 0 | 1,252 | 0,241 | 2,04 | 6,75 | 1,75 | 13,70 | 0,723 |
| 10 | 1,206 | 0,241 | 2,11 | 7,24 | 1,81 | 14,70 | 0,722 |
| 20 | 1,164 | 0,242 | 2,17 | 7,66 | 1,86 | 15,70 | 0,722 |
| 30 | 1,127 | 0,242 | 2,22 | 8,14 | 1,91 | 16,61 | 0,722 |
| 40 | 1,092 | 0,242 | 2,28 | 8,65 | 1,96 | 17,60 | 0,722 |
| 50 | 1,056 | 0,243 | 2,35 | 9,14 | 2,00 | 18,60 | 0,722 |
| 60 | 1,025 | 0,243 | 2,41 | 9,65 | 2,05 | 19,60 | 0,722 |
| 70 | 0,996 | 0,243 | 2,46 | 10,18 | 2,08 | 20,45 | 0,722 |
| 80 | 0,968 | 0,244 | 2,52 | 10,65 | 2,14 | 21,70 | 0,722 |
| 90 | 0,942 | 0,244 | 2,58 | 11,25 | 2,20 | 22,90 | 0,722 |
| 100 | 0,916 | 0,244 | 2,64 | 11,80 | 2,22 | 23,78 | 0,722 |
| 120 | 0,870 | 0,245 | 2,75 | 12,90 | 2,32 | 26,20 | 0,722 |
| 140 | 0,827 | 0,245 | 2,86 | 14,10 | 2,40 | 28,45 | 0,722 |
| 160 | 0,789 | 0,246 | 2,96 | 15,25 | 2,46 | 30,60 | 0,722 |
| 180 | 0,755 | 0,247 | 3,07 | 16,50 | 2,55 | 33,17 | 0,722 |
| 200 | 0,723 | 0,247 | 3,18 | 17,80 | 2,64 | 35,82 | 0,722 |
| 250 | 0,653 | 0,249 | 3,42 | 21,2 | 2,85 | 42,8 | 0,722 |
| 300 | 0,596 | 0,250 | 3,69 | 24,8 | 3,03 | 49,9 | 0,722 |
| 350 | 0,549 | 0,252 | 3,93 | 28,4 | 3,21 | 57,5 | 0,722 |
| 400 | 0,508 | 0,253 | 4,17 | 32,4 | 3,36 | 64,9 | 0,722 |
| 500 | 0,450 | 0,256 | 4,64 | 40,0 | 3,69 | 80,4 | 0,722 |
| 600 | 0,400 | 0,260 | 5,00 | 49,1 | 4,00 | 93,1 | 0,723 |
| 800 | 0,325 | 0,266 | 5,75 | 68,0 | 4,54 | 137,0 | 0,725 |
| 1 000 | 0,268 | 0,272 | 6,55 | 89,9 | 5,05 | 185,0 | 0,727 |
| 1 200 | 0,238 | 0,278 | 7,27 | 113,0 | 5,50 | 232,5 | 0,730 |
| 1 400 | 0,204 | 0,284 | 8,00 | 138,0 | 5,89 | 282,5 | 0,736 |
| 1 600 | 0,182 | 0,291 | 8,70 | 165,0 | 6,28 | 338,0 | 0,740 |
| 1 800 | 0,165 | 0,297 | 9,40 | 192,0 | 6,68 | 396,0 | 0,744 |

Таблица 54*

Коэффициент теплопроводности газов и паров [28]

$$\lambda \text{ в } \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$$

| | $t^\circ \text{C}$ | λ | λ_0 | $10^3 \cdot a$ | c |
|------------------------------------|---|-----------|-------------|----------------|-----|
| Ацетон | 0 0,00782** 46 0,0101 100 0,0134 184 0,0200 | | | | |
| Ацетилен | -75 0,0094 0 0,0149 50 0,0193 100 0,0238 | | | | |
| Воздух (от -191 до 212°C) | | | 0,0192 | | 125 |
| Аммиак (от -60 до 100°C) | | | 0,0173 | 8,85 | |
| Бензол | 0 0,00709 46 0,0100 100 0,0140 184 0,0207 212 0,0240 | | | | |
| Углекислый газ (от 78 до 500°C) | | | 0,0118 | 5,5 | |
| Сероуглерод . . . | 0 0,00550 8 0,00575 | | | | |
| Оксись углерода (от -191 до 7,5°C) | | | 0,0185 | | 156 |
| Четырёххлористый углерод | 46 0,00565 100 0,00695 184 0,0088 | | 0,0063 | | |
| Хлор | 0 0,00525 | | | | |
| Хлороформ | 46 0,00637 100 0,00800 184 0,0107 | | | | |
| Циклогексан . . . | 102 0,0141 | | | | |
| Этан | -70 0,00990 -34 0,0125 0 0,0155 10 0,0175 46 0,0097 100 0,0131 184 0,0194 | | | | |
| Этилацетат | 8 0,0107 20 0,0121 100 0,0163 | | | | |
| Хлористый этил . . | 0 0,0075 100 0,0130 184 0,0183 213 0,0267 | | | | |
| Этиловый вфир . . | 0 0,0104 46 0,0135 100 0,0177 184 0,0255 212 0,0283 | | | | |
| Этилен | -71 0,00900 -50 0,0104 0 0,0141 50 0,0182 100 0,0226 | | | | |
| Гексан (п) | 0 0,0089 20 0,0093 100 0,0093 | | | | |
| Гексилен | 0 0,0083 100 0,0143 | | | | |
| Водород (от -191 до 100°C) | | | 0,136 | | 94 |
| Водород-углекислый газ: | | | | | |
| 0% H ₂ | | | 0,0122 | | |
| 17,01% H ₂ | | | 0,0215 | | |
| 36,98% H ₂ | | | 0,0373 | | |

* В таблице помещены значения λ и λ_0 при 0°, постоянная a в формуле $\lambda = \lambda_0 + at$ и константа c Sutherland в формуле:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{273+c}{T+c} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2},$$

где T — в° абс. и t — в° C.

** Главным образом по «Международным справочным таблицам», по установившейся традиции значения коэффициента теплопроводности газов и паров приведены с тремя значащими цифрами, но следует иметь в виду, что точность табличных данных порядка 10%.

Продолжение табл. 54

| | $t^\circ \text{C}$ | λ | λ_0 | $10^3 \cdot a$ | c |
|---------------------------------|--|-----------|-------------|----------------|--------|
| 60,86% H ₂ | | | | | 0,0622 |
| 83,45% H ₂ | | | | | 0,101 |
| 100,00% H ₂ | | | | | 0,150 |
| Водород-азот: | | | | | |
| 0% H ₂ | | | | | 0,0198 |
| 15,9% H ₂ | | | | | 0,0289 |
| 39,0% H ₂ | | | | | 0,0457 |
| 57,4% H ₂ | | | | | 0,0530 |
| 65,2% H ₂ | | | | | 0,0700 |
| 79,5% H ₂ | | | | | 0,0910 |
| 80,3% H ₂ | | | | | 0,0925 |
| 100,0% H ₂ | | | | | 0,146 |
| Водород-закись азота: | | | | | |
| 0% H ₂ | | | | | 0,0137 |
| 7,5% H ₂ | | | | | 0,0173 |
| 20,9% H ₂ | | | | | 0,0250 |
| 38,6% H ₂ | | | | | 0,0386 |
| 59,9% H ₂ | | | | | 0,0613 |
| 81,2% H ₂ | | | | | 0,0980 |
| 100,0% H ₂ | | | | | 0,146 |
| Ртуть | 200 0,0294 | | | | |
| Метан (от -180 до 10°C) | | | | | 0,0253 |
| Метиловый спирт | 0 0,0114 | | | | 10,7 |
| То же | 100 0,0176 | | | | |
| Хлористый метилен | 0 0,00528 46 0,00668 100 0,0086 213 0,0129 | | | | |
| Метилацетат . . . | 0 0,0081 20 0,0092 | | | | |
| Бромистый метил . | 0 0,00495 100 0,0084 | | | | |
| Хлористый метил . | 0 0,00725 46 0,0099 100 0,0127 184 0,0178 213 0,0203 | | | | |
| Иодистый метил . | 0 0,00372 46 0,0047 100 0,0061 | | | | |
| Азот (от -192 до 100°C) | | | | | 0,0195 |
| Закись азота (от -70 до 100°C) | | | | | 0,0118 |
| Оксись азота (от -70 до 100°C) | | | | | 0,0179 |
| Двуокись азота (55°C) | | | | | 0,0343 |
| Кислород (от -191 до 100°C) | | | | | 0,0200 |
| Пентан (п) | 0 0,0100 20 0,0111 | | | | 114 |
| Пентан (iso) . . . | 0 0,0099 46 0,0131 | | | | 1,58 |
| Сернистый ангидрид | 46 0,0155 | | | | 195 |
| Водяной пар . . . | 100 0,0188 | | | | 144 |

Температура стенки трубы

$$t = \frac{t_{w,1} \ln \frac{d_2}{d} + t_{w,2} \ln \frac{d}{d_1}}{\ln \frac{d_2}{d_1}},$$

где $d_1 < d < d_2$.

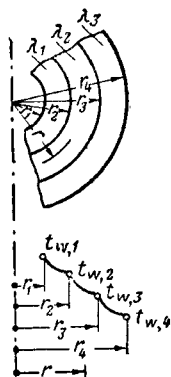
Шаровая стенка (полый шар). Стационарное, одномерное, $t = f(r)$ температурное поле определяется изотермическими поверхностями сфер, концентричных между собой. Стенка состоит из n концентричных слоёв, плотно прилегающих друг к другу, радиусы их r_1 (внутренний), r_2, \dots, r_{n+1} (внешний); коэффициенты теплопроводности $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, температуры поверхности сфер $t_{w,1}, t_{w,2}, \dots, t_{w,n+1}$.

Количество теплоты, проходящее в 1 час через шаровую стенку (фиг. 59)

$$Q = \frac{4\pi(t_{w,1} - t_{w,n+1})}{\sum_{i=1} \frac{1}{\lambda_i} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}} \right)}.$$

Количества теплоты, проходящие в 1 час через каждый слой Q_i , равны между собой и равны Q :

$$Q_i = \frac{4\pi(t_{w,i} - t_{w,i+1})}{\frac{1}{\lambda_i} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}} \right)} = Q.$$



Фиг. 59

Температура на стыке i -го и $(i+1)$ -го слоёв

$$t_{w,i+1} = t_{w,i} - \frac{Q_i}{4\pi} \cdot \frac{1}{\lambda_i} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}} \right),$$

а также

$$t_{w,i+1} = t_{w,1} - \frac{Q}{4\pi} \cdot \sum_{i=1}^i \frac{1}{\lambda_i} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}} \right).$$

Температура внутри i -го слоя на поверхности сферы радиуса r ($r_i < r < r_{i+1}$), $t_i = f(r)$

$$t_i = \frac{t_{w,i} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{i+1}} \right) + t_{w,i+1} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r} \right)}{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}}}.$$

КОНВЕКТИВНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА (КОНВЕКЦИЯ)

Общие уравнения

Конвективная теплопередача осуществляется путём переноса энергии перемещающимися в пространстве частями жидкости (капельной или газа). Теплообмен, достигаемый конвективной теплопередачей, является следствием переноса энергии перемещающимися конечными массами жидкости, сопровождаемого обязательно кондукцией, т. е. переносом энергии элементарными частицами носителя при их соприкосновении (контакте); здесь кондукция осуществляется в условиях, совершенно отличных, чем в твёрдых телах,

она зависит от перемещения конечных масс носителя энергии. Различают конвекцию естественную (свободную) и вынужденную: в первой перемещение масс жидкости есть следствие неравенства удельных весов жидкости в различных точках её за счёт неравенства в них температур; во второй — перемещение масс жидкости определяется какими-нибудь внешними побудителями, например, напором вентилятора, циркуляционного насоса.

Особое значение имеет конвекция при омывании жидкой средой поверхности твёрдого тела — теплоотдача (теплопереход).

Теплоотдача ($T \rightarrow Ж$) с элемента поверхности $dF [м^2]$ твёрдого тела (стенки) за элемент времени $d\tau$ [час], при разности температур $t_w - t_f$ (t_w — температура поверхности элемента стенки, t_f — жидкости; предположено $t_w > t_f$; если $t_f > t_w$, берут разность $t_f - t_w$ — теплоотдача $Ж \rightarrow T$):

$$dQ = \alpha(t_w - t_f) dF d\tau \text{ [ккал];}$$

здесь $\alpha \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{час}} \right]$ — коэффициент теплоотдачи, численно равный количеству теплоты, отдаваемому (или воспринимаемому) единицей поверхности стенки в единицу времени при разности температур поверхности стенки и жидкости в 1° .

При стационарном температурном поле и температуре t_w на всей поверхности F стенки

$$Q = \alpha(t_w - t_f) F \left[\frac{\text{ккал}}{\text{час}} \right].$$

Коэффициент теплоотдачи функция ряда переменных

$$\alpha = f(w, t_w, t_f, \lambda, \mu, \rho, c_p, l_1, l_2, \dots),$$

где

w — скорость,

t_f — температура жидкости,

λ — коэффициент теплопроводности,

μ — коэффициент вязкости,

ρ — плотность,

c_p — теплоёмкость, — параметры, относящиеся к жидкости;

t_w — температура стенки;

l_1, l_2, \dots — геометрические размеры, определяющие условия движения.

Явление теплоотдачи в общем виде описывается системой дифференциальных уравнений:

1. Уравнения движения вязкой жидкости:

$$\rho \frac{dw_x}{d\tau} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \cdot g + \mu \left(\nabla^2 w_x + \frac{1}{3} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right);$$

$$\rho \frac{dw_y}{d\tau} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\nabla^2 w_y + \frac{1}{3} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right);$$

$$\rho \frac{dw_z}{d\tau} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\nabla^2 w_z + \frac{1}{3} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right),$$

где

$$\theta = \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z};$$

$$\nabla^2 w_x = \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2};$$

$$\frac{dw_x}{d\tau} = \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z};$$

$\nabla^2 w_y, \nabla^2 w_z, \frac{dw_y}{d\tau}, \frac{dw_z}{d\tau}$ составляются аналогично.

2. Уравнение сплошности сжимаемой жидкости при неустановившемся режиме

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \rho \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + w_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + w_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + w_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0;$$

при установившемся движении $\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = 0$; для движения несжимаемой жидкости

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0.$$

3. Уравнение конвективного переноса теплоты Фурье — Кирхгофа (уравнение теплопроводности в движущейся среде); стационарное температурное поле

$$w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right),$$

где $a = \frac{\lambda}{\gamma c_p}$ [$\text{м}^2/\text{час}$] — коэффициент температуропроводности жидкости.

4. Уравнение теплообмена при конвективном переносе теплоты на границе раздела потока жидкости и твёрдого тела

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha (t_f - t_w).$$

Аналитическое решение этих уравнений с учётом всех условий однозначности (определяющих частные случаи) удаётся лишь по отношению к некоторым задачам и достигается на основе ряда упрощающих допущений, что снижает возможность практического применения его.

Теория подобия позволяет, не интегрируя этих дифференциальных уравнений, установить некоторые характеристические, безразмерные величины — критерии подобия, сохраняющие своё значение для целого класса (группы) подобных явлений; та же теория констатирует для класса подобных явлений обязательность функциональной зависимости между найденными критериями, но установить вид её она не в состоянии. Согласно этому для подобных явлений, описываемых приведёнными уравнениями, должны существовать зависимости между критериями:

при учёте влияний как естественной, так и вынужденной конвекции

$$Nu = f \left(Re, Gr, Pr, \frac{l}{l_0}, \frac{l_1}{l_0}, \dots \right);$$

при вынужденной конвекции

$$Nu = f_1 \left(Re, Pr, \frac{l}{l_0}, \frac{l_1}{l_0}, \dots \right);$$

при естественной конвекции

$$Nu = f_1 \left(Gr, Pr, \frac{l}{l_0}, \frac{l_1}{l_0}, \dots \right);$$

для газов с вынужденной конвекцией

$$Nu = f_3 \left(Re, \frac{l}{l_0}, \frac{l_1}{l_0}, \dots \right) = f_4 \left(Pe, \frac{l}{l_0}, \frac{l_1}{l_0}, \dots \right),$$

для газов с естественной конвекцией

$$Nu = f_5 \left(Gr, \frac{l}{l_0}, \frac{l_1}{l_0}, \dots \right),$$

где

$$\text{критерий Рейнольдса } Re = \frac{wl}{\nu};$$

$$\text{критерий Пекле } Pe = \frac{wl}{a};$$

$$\text{критерий Прандтля } Pr = \frac{\nu}{a};$$

$$\text{критерий Грасгофа } Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \vartheta \cdot l^3}{\nu^2};$$

$$\text{критерий Нуссельта } Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}.$$

Здесь ν [$\text{м}^2/\text{сек}$] — коэффициент кинематической вязкости, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$; $a = \frac{\lambda}{\gamma c_p}$ [$\text{м}^2/\text{час}$] — коэффициент температуропроводности; λ [$\text{ккал}/\text{м} \cdot \text{град} \cdot \text{час}$] — коэффициент теплопроводности; α [$\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{час}$] — коэффициент теплоотдачи; w [$\text{м}/\text{сек}$] — скорость; g [$\text{м}/\text{сек}^2$] — ускорение силы тяжести; β [$1/\text{град}$] — коэффициент объёмного расширения; ϑ [град] — избыточная температура; l [м] — характерный линейный размер, для труб обычно диаметр.

Критерии Re и Gr выводятся из уравнений движения, характеризуют подобие сил: первый — сил внутреннего трения (вязкости), второй — земного тяготения (подъёмную силу). Критерий Pe находится из уравнения Фурье — Кирхгофа, определяет подобие явлений в отношении теплопроводности в движущихся средах. Критерий Nu даёт условия подобия в пограничном слое. Критерий Pr находится как отношение $\frac{Pe}{Re} = \frac{\nu}{a}$, ценен тем, что отражает физические свойства, природу движущейся среды.

Так как $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$, то $\alpha = \frac{\lambda}{l} Nu$, т. е.

знание критерия Нуссельта даёт возможность определить коэффициент теплоотдачи.

Вид этих функциональных зависимостей для явлений, входящих в класс подобных, находится экспериментально.

При пользовании для нахождения α экспериментальными формулами нужно обращать внимание на пределы применимости формулы, определяемые диапазоном изменения критериев, охваченным при осуществлении опыта; необоснованный выход за пределы может привести к крупным ошибкам в расчётах.

При пользовании расчётными формулами, выраженными в критериях подобия, температуру, по которой берутся вводимые в формулу физические параметры, так называемую определяющую температуру, следует брать согласно приводимым указаниям к

формуле (при помощи подстрочного индекса) ибо выбор этой определяющей температуры у различных экспериментаторов не согласован.

Теплоотдача в вынужденном потоке жидкости (вынужденная конвекция)

1. Теплоотдача в прямой трубе. Турбулентное движение.

Формула Нуссельта*

$$Nu_m = 0,0344 Pe_m^{0,79} \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^{-0,05}$$

строго применима для стабилизированного, турбулентного потока газов и перегретых паров, протекающих по прямой трубе и испытывающих подогрев от стенки, при температуре газов не выше 600°C , при $Pe_m = 1000 - 7000$; подстрочный индекс m — указание на выбор определяющей температуры $t_m = \frac{t_w + t_f}{2}$; t_w и t_f — температуры стенки и жидкости; l [м] — длина трубы; d [м] — диаметр.

Возможно экстраполирование формулы на большие значения Pe_m .

Формула Крауссольтда

$$Nu_f = 0,032 Re_f^{0,8} Pr_f^m \cdot \left(\frac{1}{d}\right)^{-0,054};$$

индекс f — указание на определяющую температуру; t_f — температура жидкости.

Формула применима как для капельных жидкостей, так и для газов, для стабилизированного, турбулентного потока, при $Re_f > 10\,000$ и при $0,7 < Pr_f < 10\,000$.

По Крауссольтду, при нагревании жидкости показатель у критерия Pr_f $m = 0,37$, при охлаждении $m = 0,33$; по М. В. Кирпичёву, целесообразно принять $m = 0,35$ в обоих случаях.




При $\frac{l}{d} = 100 \div 400$ приближённая формула Крауссольтда

$$Nu_f = 0,024 Re_f^{0,8} \cdot Pr_f^m.$$

Формулы Нуссельта и Крауссольтда применимы не только для случая продольного протекания потока жидкости (капельной или упругой) внутри круглой трубы, но и для прямого канала произвольного постоянного сечения F ; при расчёте вместо d вводят эквивалентный диаметр $d_{экв} = \frac{4F}{U}$, где F — попе-

речное сечение канала; U — активный периметр сечения, являющийся проекцией на плоскость, нормальную к оси канала, поверхности его, участвующей в теплоотдаче.

Значения эквивалентного диаметра

| | Эквивалентный диаметр |
|--|-----------------------|
| 1. Круглая труба  | d |
| 2. Прямоугольник  a : | |
| а) теплообмен через все стороны | $\frac{2ab}{a+b}$ |
| б) теплообмен через две противоположные стороны (a) | $2b$ |
| в) теплообмен через одну сторону (a) | $4b$ |
| 3. Квадрат  a | a |
| 4. Кольцевое сечение: | |
| а) теплообмен через внутреннюю и внешнюю поверхности | $\frac{D^3 - d^3}{D}$ |
| б) теплообмен только через внешнюю поверхность | $\frac{D^3 - d^3}{D}$ |
| в) теплообмен только через внутреннюю поверхность | $\frac{D^3 - d^3}{d}$ |

М. А. Михеев считает наиболее точной следующий вид формулы:

$$Nu_f = 0,023 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,4},$$

где определяющей температурой принимается среднегеометрическая температура жидкости t_f , а определяющим размером — диаметр трубы d . Формула применима для всех капельных и упругих жидкостей при $Re_f > 1 \cdot 10^4$, $Pr_f = 0,7 \div 2500$ и при температуре стенки ниже температуры кипения жидкости. Формула применима и для труб и каналов любого сечения при внутреннем протекании жидкости, а также при внешнем продольном омывании. Однако для продольного движения жидкости по кольцевому зазору формула пригодна только для случая теплообмена по внешней (большой) поверхности.

Для случая теплообмена с внутренней поверхностью кольцевого зазора М. А. Михеев предлагает пользоваться формулой [33]

$$Nu_f = 0,023 \left| \frac{d_2}{d_1} \right|^{0,45} \cdot Re_f^{0,8} Pr_f^{0,4},$$

где d_2 — наружный диаметр внутренней трубы;

d_1 — внутренний диаметр внешней трубы.

Обе последние формулы применимы при

$$\frac{d_2}{d_1} = 0,1 \div 1.$$

Формула

$$Nu_f = 0,023 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,4}$$

в развёрнутом виде может быть представлена так:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,023 \frac{\lambda_f}{d} \left(\frac{w \cdot d}{\nu_f} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{\nu_f}{a_f} \right)^{0,4} = \\ &= B \frac{(\gamma \cdot w)_f^{0,8}}{d^{0,2}}, \end{aligned}$$

где

$$B = 0,023 (3600)^{0,4} \frac{\lambda_f^{0,6} \cdot c_p^{0,4}}{(\mu_f \cdot g)^{0,4}},$$

* Nusselt W., Mitt., Forschungsarbeit, 80. 1, 1910.

причём $w \left[\frac{м}{сек} \right]$, $\gamma \left[\frac{кг}{м^3} \right]$, $d \left[м \right]$, $\lambda \left[\frac{ккал}{м \cdot час \cdot град} \right]$,
 $c_p \left[\frac{ккал}{кг \cdot град} \right]$.

Значения B для воздуха

| t_f, C | 0 | 50 | 100 | 200 | 300 | 500 | 1000 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| B | 2,68 | 2,80 | 2,88 | 3,02 | 3,15 | 3,34 | 3,73 |

Значения B для воды

| t_f, C | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 150 | 200 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| B | 4,91 | 6,45 | 7,98 | 9,30 | 10,5 | 11,1 | 14,0 | 15,8 |

Вынужденный поток при ламинарном движении. Формула Краусольда

$$Nu_f = 15,0 Pe_f^{0,23} \left(\frac{l}{d} \right)^{-0,5}$$

при нагревании жидкости,

$$Nu_f = 11,5 Pe_f^{0,23} \left(\frac{l}{d} \right)^{-0,5}$$

при охлаждении жидкости.

Обе формулы относятся к опытам с вертикально расположенной трубой и подводом жидкости снизу. Для других условий расположения трубы и подвода жидкости расчёт следует вести по формуле, дающей среднее значение коэффициента теплоотдачи

$$Nu_f = 13,2 Pe_f^{0,23} \cdot \left(\frac{l}{d} \right)^{-0,5}.$$

Формула Ватцингера — Джонсона [22] для ламинарной и переходной области ($Re = 1350 - 4600$)

$$Nu_{\#} = 0,255 Gr_{\#}^{0,25} \cdot Re_{\#}^{0,07} \cdot Pr_{\#}^{0,37},$$

где определяющая температура

$$t_{\#} = t_f - 0,54(t_f - t_w).$$

При ламинарном режиме движений в трубах и каналах лучшее совпадение с опытными данными даёт формула Зидера и Тейта [33].

Формула применима как при нагревании, так и охлаждении жидкости; даёт среднее по длине α при горизонтальном положении трубы; при вертикальном положении трубы формула не учитывает направления движения жидкости.

$$Nu_f = 1,86 Re_f^{1/3} \cdot Pr_f^{1/3} \left(\frac{d}{l} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,14} =$$

$$= 2,02 Gz^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,14}.$$

В развёрнутом виде формула принимает следующий вид:

$$\alpha = 28,5 \left(\frac{w \gamma \lambda^2 c_p}{ld} \right)_f^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,14} =$$

$$= 2,02 \left(\frac{G \cdot \lambda^2 c_p}{ld^3} \right)_f^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,14}.$$

В этих формулах

$Gz = \frac{Gc_p}{\lambda \cdot l}$ — критерий Гретца;

w — скорость жидкости в $м/сек$;

G — весовой расход жидкости в $кг/час$;

d — диаметр трубы, принимаемый за определяющий размер;

t_w — температура омываемой поверхности;

t_f — средняя арифметическая температура жидкости, принятая определяющей;

μ_f и μ_w — коэффициент вязкости жидкости соответственно по t_f и t_w .

Для применения формулы к каналам вместо d вводится $d_{эк}$.

2. Теплоотдача в изогнутых трубах (колена, переходы, спирали). По опытам Иешке [32], при турбулентном режиме движения с воздухом до $Re = 150000$

$$Nu_m = \left(0,039 + 0,063 \frac{d}{R} \right) Pe_m^{0,76},$$

где d — диаметр трубы; R — радиус закругления.

Соотношение между теплоотдачей в изогнутой трубе с теплоотдачей в прямой трубе Иешке даёт формулой

$$Nu_{изогнут} = \left(1 + 1,77 \frac{d}{R} \right) Nu_{прям}.$$

3. Теплоотдача одиночной трубы, смываемой поперечным потоком жидкости. По опытам Гильперта, со свободным незавихренным потоком воздуха, направленным нормально к трубе и получающим подогрев от неё (скорость воздуха от 2 до 30 $м/сек$ при диаметрах трубы или цилиндра от 0,099 до 155 $мм$), теплоотдача определяется формулой

$$Nu_f = c \cdot Re_f^n,$$

где c и n выбираются из таблицы:

| Re_f | c | n |
|-------------------------------|-------|------|
| $1 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3$ | 0,590 | 0,47 |
| $5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$ | 0,197 | 0,60 |
| $5 \cdot 10^4$ и выше | 0,023 | 0,80 |

Данные Гильперта дают наименьшее значение коэффициента теплоотдачи, характеризуют его значение в незавихренном потоке воздуха (при нормальной турбулентности).

Влияние турбулентности учитывается коэффициентом χ

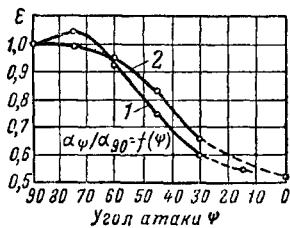
$$Nu_f = c Re_f^n \cdot \chi,$$

где χ берут по таблице (см. стр. 587).

Приведённые соотношения даны для случая угла атаки (угол, составленный направлением потока и осью трубы), равного 90° ; при угле атаки ψ , отличном от 90° ,

Таблица значений χ

| Автор эксперимента | χ | Условия эксперимента |
|--------------------|--------|--|
| Гильперт | 1,0 | Свободная струя по выходе из сопла |
| Эйгенсон | 1,0 | Всасывающая труба с плавным входом |
| Кузнецов | 1,0 | Всасывающая труба с плавным входом |
| Михеев | 1,08 | Замкнутая труба с успокоительной решёткой |
| Форнем и Рейер . | 1,18 | Замкнутая труба, после вентилятора, с успокоительной решёткой |
| Мак-Интайр . . | 1,50 | Замкнутая труба, после вентилятора, без успокоительной решётки |



Фиг. 60

$$\varepsilon = \frac{\alpha_{\psi}}{\alpha_{90}} = \frac{Nu_{\psi}}{Nu_{90}},$$

где ε , по данным Синельникова и Чашихина [19], дан кривой 1, по данным Форнема [33] — кривой 2 (фиг. 60).

По Ульзамеру [33], обобщённая зависимость для капельных жидкостей и газов

$$Nu_f = c \cdot R_f^n \cdot P_r^{0,31},$$

где c и n берутся из таблицы (корректированной по данным Гильперта и Эйгенсона):

| Re_f | c | n |
|-------------------------------|--------|------|
| $1 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3$ | 0,652 | 0,47 |
| $5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$ | 0,218 | 0,60 |
| $5 \cdot 10^4$ и выше | 0,0254 | 0,80 |

4. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке воздуха. По работам Н. В. Кузнецова во Всесоюзном теплотехническом институте, теплоотдача от пучка труб к воздуху при поперечном обтекании пучка при коридорном и шахматном расположениях труб определяется соотношением

$$Nu_m = c \cdot Re_m^n.$$

При вычислении критериев коэффициент теплопроводности λ и коэффициент вязкости μ отнесены к средней температуре t_m пограничного слоя, плотность ρ отнесена к той температуре, к которой относится скорость w , берущаяся по самому узкому сечению в пучке.

Константы c и n берутся из табл. 55 и 56 по шагу s_1 между трубами вдоль ряда и шагу s_2 между рядами вдоль направления потока воздуха и диаметру труб d .

Случай теплоотдачи [27], когда поток направлен к пучку не под углом атаки 90° , а под некоторым острым углом ψ , учитывается соотношением

$$Nu_{(\psi)} = Nu_{(90)} \cdot \omega,$$

где ω берётся из таблицы:

| $\psi =$ | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 |
|------------|----|----|------|------|------|------|------|------|------|
| $\omega =$ | 1 | 1 | 0,98 | 0,94 | 0,88 | 0,78 | 0,67 | 0,52 | 0,42 |

В переработке Д. А. Литвинова для омывания пучка труб поперечным потоком воздуха или дымовых газов опытные данные

Таблица 55

Значения c и n для коридорных пучков [22]

| Ряды в пучке | $\frac{s_1}{d} \rightarrow$ | От 1,2 до 1,5 | От 1,5 до 2,0 | От 2,0 до 2,5 | От 2,5 до 3,0 | От 3,0 до 4,0 | n |
|--|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------|
| | $\frac{s_2}{d} \downarrow$ | c | c | c | c | c | |
| Для первого ряда | От 1,2 | 0,182 | 0,188 | 0,195 | 0,200 | 0,205 | 0,60 |
| Для каждого из остальных рядов | до 1,5 | 0,178 | 0,172 | 0,169 | 0,164 | 0,161 | 0,65 |
| Для первого ряда | От 1,5 | 0,177 | 0,182 | 0,188 | 0,190 | 0,192 | 0,60 |
| Для каждого из остальных рядов | до 2,0 | 0,173 | 0,170 | 0,168 | 0,165 | 0,162 | 0,65 |
| Для первого ряда | От 2,0 | 0,175 | 0,176 | 0,179 | 0,183 | 0,190 | 0,60 |
| Для каждого из остальных рядов | до 2,5 | 0,169 | 0,168 | 0,167 | 0,166 | 0,164 | 0,65 |
| Для первого ряда | От 2,5 | 0,178 | 0,183 | 0,187 | 0,198 | 0,200 | 0,60 |
| Для каждого из остальных рядов | до 3,0 | 0,165 | 0,167 | 0,170 | 0,168 | 0,164 | 0,65 |
| Для первого ряда | От 3,0 | 0,180 | 0,192 | 0,207 | 0,217 | 0,225 | 0,60 |
| Для каждого из остальных рядов | до 4,0 | 0,161 | 0,165 | 0,171 | 0,170 | 0,169 | 0,65 |

Таблица 56

Значения ϵ и n для шахматных пучков [22]

| Ряды в пучке | $\frac{s_1}{d} \rightarrow$ | От 1,1 до 1,3 | От 1,3 до 1,6 | От 1,6 до 1,9 | От 1,9 до 2,5 | От 2,5 до 3,0 | От 3,0 до 5,0 | n |
|--|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------|
| | $\frac{s_2}{d} \downarrow$ | ϵ | ϵ | ϵ | ϵ | ϵ | ϵ | |
| Среднее для первых четырёх рядов | От 1,1 | 0,220 | 0,205 | 0,218 | 0,230 | 0,240 | — | 0,62 |
| Среднее для каждого из остальных рядов | до 1,3 | 0,315 | 0,300 | 0,220 | 0,340 | 0,350 | — | 0,60 |
| Среднее для первых четырёх рядов | От 1,3 | 0,205 | 0,207 | 0,215 | 0,225 | 0,230 | — | 0,62 |
| Среднее для каждого из остальных рядов | до 1,6 | 0,292 | 0,295 | 0,300 | 0,315 | 0,335 | — | 0,60 |
| Среднее для первых четырёх рядов | От 1,6 | 0,202 | 0,206 | 0,212 | 0,218 | 0,224 | — | 0,62 |
| Среднее для каждого из остальных рядов | до 2,0 | 0,275 | 0,285 | 0,295 | 0,305 | 0,315 | — | 0,60 |
| Среднее для первых четырёх рядов | От 2,0 | 0,200 | 0,205 | 0,208 | 0,213 | 0,218 | — | 0,62 |
| Среднее для каждого из остальных рядов | до 3,0 | 0,260 | 0,270 | 0,280 | 0,290 | 0,300 | — | 0,60 |
| Среднее для первых четырёх рядов | От 3,0 | 0,200 | 0,204 | 0,206 | 0,208 | 0,214 | — | 0,62 |
| Среднее для каждого из остальных рядов | до 4,0 | 0,250 | 0,265 | 0,275 | 0,285 | 0,295 | — | 0,60 |
| Среднее для первых четырёх рядов | От 4,0 | — | — | — | — | — | 0,214 | 0,62 |
| Среднее для каждого из остальных рядов | до 5,0 | — | — | — | — | — | 0,290 | 0,60 |

Антуфьева [1] и Кузнецова [25] даются и формулой

$$Nu_f = C \cdot \epsilon_m Re^n,$$

где определяющий размер диаметр трубок — d , определяющая температура t_f — средняя температура газового потока, а скорость отнесена к самому узкому сечению в пучке (ряде).

Значения C , ϵ_m , n см. в табл. 57.

Таблица 57

| Ряды | Коридорное расположение | | Шахматное расположение | | C |
|------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|----------------------------------|
| | n | ϵ_m | n | ϵ_m | |
| 1 | 0,60 | 0,15 | 0,60 | 0,15 | при $\frac{x_1}{d} = 1,2 \div 3$ |
| 2 | 0,65 | 0,138 | 0,60 | 0,20 | $C = 1 + 0,1 \frac{x_1}{d}$ |
| 3 | 0,65 | 0,138 | 0,60 | 0,255 | при $\frac{x_1}{d} > 3$ |
| 4 | 0,65 | 0,138 | 0,60 | 0,255 | $C = 1,3 = \text{const}$ |

x_1 — расстояние между центрами труб в ряду;

x_2 — расстояние между осевыми линиями двух смежных рядов.

Приведённые значения коэффициентов применимы только для круглых труб при:

$$\frac{x_1}{d} = 1,2 \div 5,$$

$$\frac{x_2}{d} = 1,2 \div 5,$$

$$Re_f = 5 \cdot 10^3 \div 7 \cdot 10^4.$$

В развёрнутом виде формула будет:

$$\text{при } n = 0,6 \quad \alpha = C \cdot \epsilon_m E_1 \frac{(w \cdot \gamma)^{0,6}}{d^{0,4}};$$

$$\text{при } n = 0,65 \quad \alpha = C \cdot \epsilon_m E_2 \left(\frac{w \cdot \gamma}{d^{0,35}} \right)^{0,65},$$

где w — м/сек, γ — кг/м³, d — м, g — м/сек²,

$$\lambda = \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}, \quad \mu = \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2};$$

значения

$$E_1 = \frac{\lambda}{(\mu g)^{0,60}}$$

и

$$E_2 = \frac{\lambda}{(\mu \cdot g)^{0,65}}$$

для газов см. в табл. 58.

Таблица 58

| $t, ^\circ\text{C}$ | 0 | 50 | 100 | 200 | 300 | 500 | 1000 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| E_1 | 14,7 | 15,7 | 16,4 | 17,9 | 19,2 | 21,4 | 25,0 |
| E_2 | 25,0 | 27,0 | 28,2 | 30,4 | 32,1 | 35,6 | 40,9 |

Приведённые формулы дают среднее α для трубки любого ряда (так как для рядов выше четвёртого значения n и ϵ_m уже не меняются).

Средний коэффициент теплоотдачи $\alpha_{пуч}$ для всего пучка будет

$$\alpha_{пуч} = \frac{\alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \dots + \alpha_m F_m}{F_1 + F_2 + \dots + F_m},$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ — коэффициенты теплоотдачи по рядам; F_1, F_2, \dots, F_m — поверхности нагрева всех трубок соответственного ряда.

Для поперечного обтекания пучка труб каплевыми жидкостями достоверных формул не имеется, ориентировочно используется [33]

$$Nu_f = C \cdot \varepsilon'_m Re_f^{0,3} \cdot Pr^{0,3}.$$

Коэффициенты см. в табл. 59.

Таблица 59

| Ряды | Коридорн. | | Шахматн. | | С |
|------|-----------|-----------------|----------|-----------------|----------------------------------|
| | n | ε_m | n | ε_m | |
| 1 | 0,60 | 0,17 | 0,60 | 0,17 | При $\frac{x_1}{d} = 1,2 \div 3$ |
| 2 | 0,65 | 0,155 | 0,60 | 0,225 | $C = 1 + 0,1 \frac{x_1}{d}$ |
| 3 | 0,65 | 0,155 | 0,60 | 0,287 | При $\frac{x_1}{d} > 3$ |
| 4 | 0,65 | 0,155 | 0,60 | 0,287 | $C = 1,3$ |

Примечание. Коэффициенты применимы для круглых труб в случае $\frac{x_1}{d} = 1,2 \div 5$; $\frac{x_2}{d} = 1,2 \div 5$; $Re_f = 5 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^4$

5. Теплоотдача плоских вертикальных плит в вынужденном потоке воздуха. Формула Н. А. Скняря [22]

$$Nu_w = 0,044 \cdot Re_w^{0,77} \cdot \left(\frac{T_w}{T_f} \right).$$

Определяющим линейным размером принята длина плиты l_0 ; определяющей температурой — температура стенки t_w . Формула даётся для значений Re_w от $5 \cdot 10^4$ до $1,7 \cdot 10^6$.

ТЕПЛОТДАЧА В СВОБОДНОМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ (ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ)

1. Теплоотдача вертикальных труб [50]. Приводимые ниже формулы Эйгенсона дают возможность по критерию Нуссельта определить локальное значение коэффициента теплоотдачи α_x для любой высоты x и среднее значение его α по высоте от $x = 0$ до $x = H$. Формулы справедливы для двухатомных газов ($Pr = 0,72$) для расчёта теплоотдачи вертикальных проволок, труб, и плит, имеющих по поверхности равномерную температуру. Индекс x означает, что при рассмотрении локального значения коэффициента за определяющий размер при нахождении критериев принято расстояние x от низа трубы или плиты.

Индекс H указывает, что при рассмотрении среднего значения коэффициента теплоотдачи на участке трубы или плиты высотой H за определяющий размер принята высота H .

Индекс d указывает на определяющий размер, диаметр для выяснения пределов применимости формулы для труб и проволок.

Индекс m указывает на определяющую температуру.

$$t_m = \frac{t_w + t_f}{2}.$$

Плиты и трубы при $Gr_{md} > 10^8$:

1) для $Gr_{mx} < 10^9$ — ламинарная область движения:

$$Nu_{mx} = 0,36 Gr_{mx}^{1/4};$$

$$Nu_{mH} = 0,48 Gr_{mH}^{1/4}.$$

2) для $10^9 < Gr_{mx} < 1,7 \cdot 10^{10}$ — переходная область:

$$Nu_{mx} = 1,37 \cdot 10^{-4} \cdot Gr_{mx}^{0,63};$$

$$Nu_{mH} = 51,5 + 7,26 \cdot 10^{-5} \cdot Gr_{mH}^{0,63};$$

3) для $Gr_{mx} > 1,7 \cdot 10^{10}$:

$$Nu_{mx} = 0,148 Gr_{mx}^{1/2};$$

$$Nu_{mH} = 0,148 Gr_{mH}^{1/2} - 127,6.$$

Трубы при $Gr_{md} < 10^8$.

Для $Gr_{mx} > 1,7 \cdot 10^{10}$

$$Nu_{mx} = B \cdot Gr_{mx}^{1/2};$$

$$Nu_{mH} = B \cdot Gr_{mH}^{1/2}.$$

Проволочки:

1) $Gr_{md} < 0,14$ (при ламинарном течении):

$$Nu_{md} = 0,45;$$

2) $Gr_{md} > 0,14$:

$$Nu_{md} = B \cdot Gr_{md}^{1/3}.$$

Значения величины B берутся из таблицы:

| $Gr_{md} =$ | 10^{-1} | 10^0 | 10^1 | 10^2 | 10^3 | 10^4 | 10^5 |
|-------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $B =$ | 1,93 | 0,934 | 0,545 | 0,349 | 0,245 | 0,184 | 0,156 |

| $Gr_{md} =$ | 10^6 | 10^7 | 10^8 | 10^9 | 10^{10} | 10^{11} |
|-------------|--------|--------|--------|--------|-----------|-----------|
| $B =$ | 0,148 | 0,148 | 0,148 | 0,148 | 0,148 | 0,148 |

2. Теплоотдача горизонтальных наклонных труб [22]. Для приближённых расчётов горизонтальных труб в воздухе применима формула Гриффитса-Дэвиса, среднее значение α

$$\bar{\alpha} = A \sqrt[4]{t_w - t_f},$$

где t_w и t_f — температуры поверхности трубы и воздуха; формула применима для $\Delta t > 15^\circ \text{C}$ при $d \geq 5 \text{ мм}$; A берётся из таблицы:

| d в мм = | 5 | 10 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $A =$ | 4,85 | 3,53 | 1,94 | 1,80 | 1,73 | 1,73 | 1,73 |

Для наклонных труб применяется формула Коха

$$\bar{\alpha} = D \cdot \Delta t^{0,24},$$

где D берётся из табл. 60.

Таблица 60
Значения постоянной D в формуле Коха

| Диаметр трубы в мм | Наклон к горизонту в градусах | | | | | | |
|--------------------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 |
| 20 | 2,7 | 2,7 | 2,6 | 2,5 | — | — | — |
| 40 | 2,3 | 2,2 | 2,2 | 2,1 | 1,92 | — | — |
| 60 | 2,1 | 2,1 | 2,0 | 1,94 | 1,80 | 1,61 | 1,30 |
| 80 | 1,98 | 1,97 | 1,94 | 1,89 | 1,78 | 1,61 | 1,30 |
| 100 | 1,90 | 1,90 | 1,89 | 1,87 | 1,78 | 1,61 | 1,30 |
| 120 | 1,88 | 1,83 | 1,88 | 1,87 | 1,78 | 1,61 | 1,30 |

По М. А. Михееву [33], при естественной конвекции теплоотдача для горизонтальных и вертикальных проволок, труб, плит и шаров охватывается критериальным выражением

$$Nu_m = C (Gr \cdot Pr)_m^n,$$

где C берутся в зависимости от $(Gr \cdot Pr)_m$ по следующей таблице.

Значения C и n

| $(Gr \cdot Pr)_m$ | C | n | $(Gr \cdot Pr)_m$ | C | n |
|-------------------------------------|------|-----|----------------------------------|-------|-----|
| $1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$ | 0,50 | 0 | $5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$ | 0,54 | 1/4 |
| $1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$ | 1,18 | 1/8 | $2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{12}$ | 0,135 | 1/3 |

Условия, определяемые в таблице строкой первой, отвечают плёночному режиму движения; строкой второй — ламинарному режиму движения; строкой третьей — интенсивному ламинарному и локонообразному режимам движений; строкой четвёртой — вихревому режиму движения.

При вычислении критериев за определяющий геометрический размер принимается для труб и шаров их диаметр, для плит вертикальных — их высота, для плит горизонтальных — меньшая сторона плит.

Определяющей температурой берётся средняя температура пограничного слоя

$t_m = \frac{1}{2} (t_w + t_f)$, где t_w — температура стенки и t_f — температура среды (жидкости) на большом удалении от стенки (вне зоны, охваченной процессом).

При определении из приведённого критериального уравнения коэффициента теплоотдачи α для горизонтальной плиты полученное расчётное значение α , если теплоотдающая поверхность плиты обращена кверху, должно быть увеличено на 30%; наоборот, если теплоотдающая поверхность обращена книзу, α должно быть уменьшено на 30%.

Могут быть использованы частные формулы, вытекающие из приведённого выше критериального уравнения.

1. Для проволок:

при $(Gr \cdot Pr)_m = 10^{-4} \div 10^{-3}$

$$\alpha = 0,5 \frac{d}{\lambda_m},$$

при $(Gr \cdot Pr)_m = 10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$

$$\alpha = 1,18 (\beta g \cdot Pr_m)^{\frac{1}{8}} \cdot \frac{\lambda_m}{\sqrt[3]{l^5}} \cdot \left(\frac{\Delta t}{l^5} \right)^{1/4} =$$

$$= 2,38 \cdot A_1 \left(\frac{\Delta t}{l^5} \right)^{1/4},$$

где β — коэффициент объёмного расширения в $\frac{1}{^\circ\text{C}}$;

g — ускорение силы тяжести в $\frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$;

$\Delta t = t_w - t_f$ — температурный напор в $^\circ\text{C}$;
 l и $l_{(мм)}$ — определяющий линейный размер в м и мм ;

$$A_1 = 1,18 (\beta g Pr_m)^{1/8} \frac{\lambda_m}{\sqrt[3]{l^5}}.$$

Значения A_1 для воздуха и воды даны в табл. 61 и 62.

2. Для труб, сфер и вертикальных плит: при $(Gr \cdot Pr)_m = 5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$

$$\alpha = 0,54 (\beta g Pr_m)^{1/4} \frac{\lambda_m}{\sqrt[3]{l^5}} \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{1/4} =$$

$$= 5,62 A_2 \left(\frac{\Delta t}{l_{(мм)}} \right)^{1/4},$$

при $Gr \cdot Pr_m > 2 \cdot 10^7$

$$\alpha = 0,135 (\beta g Pr_m)^{1/3} \frac{\lambda_m}{\sqrt[3]{l^5}} \cdot \Delta t^{1/3} = A_3 \cdot \Delta t^{1/3},$$

где

$$A_2 = 0,54 (\beta g Pr_m)^{1/4} \frac{\lambda_m}{\sqrt[3]{l^5}},$$

$$A_3 = 0,135 (\beta g Pr_m)^{1/3} \frac{\lambda_m}{\sqrt[3]{l^5}};$$

для воздуха и воды A_2 и A_3 см. табл. 61 и 62.

Таблица 61
Значения A_1 , A_2 для воздуха

| $t_m, ^\circ\text{C}$ | 0 | 50 | 100 | 200 | 300 | 500 | 1000 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| A_1 | 0,25 | 0,27 | 0,28 | 0,31 | 0,33 | 0,37 | 0,32 |
| A_2 | 1,19 | 1,18 | 1,17 | 1,15 | 1,13 | 1,12 | 1,05 |
| A_3 | 1,48 | 1,40 | 1,38 | 1,21 | 1,13 | 1,03 | 0,85 |

Таблица 62
Значения A_1 , A_2 и A_3 для воды

| $t_m, ^\circ\text{C}$ | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 150 | 200 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A_1 | 9,64 | 11,0 | 12,2 | 13,2 | 13,9 | 14,4 | 15,0 | 15,1 |
| A_2 | 75,3 | 92,0 | 106,0 | 119,0 | 128,0 | 137,0 | 148,0 | 154,0 |
| A_3 | 130,0 | 167,0 | 200,0 | 228,0 | 254,0 | 276,0 | 305,0 | 322,0 |

Теплоотдача плит

При вертикальном расположении плит условия теплоотдачи аналогичны условиям теплоотдачи вертикальных труб (см. выше). Приближенный расчёт плит при $H = 1$ м:

$$\alpha = 3,0 + 0,08 \Delta t \quad (\text{формула Нуссельта, при } \Delta t < 15^\circ \text{ C});$$

$$\bar{\alpha} = 3,45 \cdot \Delta t^{0,13} \quad (\text{формула В. С. Жуковского, при } 85 < \Delta t < 150^\circ \text{ C});$$

$$\bar{\alpha} = 4,8 \sqrt[4]{\frac{\Delta t}{T_f \cdot H}} \cdot \sqrt[4]{\frac{b}{760}},$$

где H [м] — высота плиты; b — барометрическое давление в мм ртутного столба (формула Шмидта и Бекмана).

Для горизонтальной плиты, обращённой теплоотдающей поверхностью вверх,

$$\bar{\alpha} = 2,8 \sqrt[4]{\Delta t} \quad (\text{формула Хенки});$$

$$\bar{\alpha} = 2,15 \sqrt[4]{\Delta t} \quad (\text{формула Гриффитса-Дэвиса}).$$

Формулы В. С. Жуковского:

$$\Delta t < 15^\circ \text{ C} \quad \bar{\alpha} = 2,2 \Delta t^{0,25};$$

$$15 < \Delta t < 90^\circ \text{ C} \quad \bar{\alpha} = 2,95 \Delta t^{0,27};$$

$$90 < \Delta t < 180^\circ \text{ C} \quad \bar{\alpha} = 4,2 \cdot \Delta t^{0,19}.$$

Для горизонтальной плиты, обращённой теплоотдающей поверхностью вниз,

$$\bar{\alpha} = 1,13 \Delta t^{0,25} \quad (\text{формула Гриффитса-Дэвиса})$$

$$\bar{\alpha} = 120 \cdot \lambda_w \left(1 - \frac{30}{\Delta t} \right),$$

где λ_w — коэффициент теплопроводности воздуха (формула В. С. Жуковского).

Теплоотдача при конденсации

При осаждении конденсата на холодной поверхности в виде сплошной плёнки конденсацию называют плёночной, при осаждении конденсата на поверхности в виде отдельных капель — капельной.

По теории плёночной конденсации Нуссельта, для плоской вертикальной стенки толщина плёнки конденсата δ на расстоянии x от верхнего конца плиты

$$\delta = \sqrt[4]{\frac{4 \lambda \cdot \mu (t_s - t_w) \cdot x}{\gamma \cdot r}},$$

где δ [м] — толщина плёнки;

$\lambda \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{град} \cdot \text{час}} \right]$ — коэффициент теплопроводности конденсата;

$\mu \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{час}}{\text{м}^2} \right]$ — коэффициент вязкости конденсата;

t_s — температура насыщенного пара;

t_w — температура стенки;

x [м] — расстояние от верха плиты;

γ [кг/м³] — удельный вес конденсата;

r [ккал/кг] — теплота парообразования.

Локальное значение коэффициента

$$\alpha \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{час}} \right] \text{ на расстоянии } x$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta} \sqrt[4]{\frac{A}{4x \cdot \Delta t}},$$

где

$$\Delta t = t_s - t_w,$$

$$A = \frac{r \cdot \gamma^2 \cdot \lambda^3}{\mu} \left[\frac{\text{ккал}^4}{\text{м}^7 \cdot \text{час}^4 \cdot ^\circ \text{C}^3} \right]; \text{ среднее значение}$$

коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{час}} \right]$

для всей стенки высотой H

$$\bar{\alpha} = 0,943 \sqrt[4]{\frac{A}{H \cdot \Delta t}}.$$

Параметр A выбирают по средней температуре слоя плёнки

$$t_m = \frac{1}{2} (t_s + t_w).$$

Формула применима не только для вертикальной стенки, но и для вертикальных труб, если, как это и бывает всегда на практике, толщина плёнки невелика по сравнению с радиусом кривизны трубы.

Если угол наклона стенки к горизонту β , то

$$\bar{\alpha}_\beta = \bar{\alpha}_{90} \cdot \sqrt{\sin \beta}.$$

Для горизонтальной трубы

$$\bar{\alpha} = 0,724 \sqrt[4]{\frac{A}{d \cdot \Delta t}},$$

$$\frac{\bar{\alpha}_{20p}}{\bar{\alpha}_{верт}} = 0,766 \sqrt[4]{\frac{H}{d}}.$$

По С. С. Кутателадзе, при конденсации пара связь между критериями подобия устанавливается зависимостью $\psi = f(\theta)$, в которой ψ и θ через критерии подобия

$$\overline{Nu} = \bar{\alpha} \cdot \frac{H}{\lambda}, \quad \overline{Pr} = \frac{\nu}{a}, \quad \overline{Ga} = \frac{g H^3}{\nu^2} \quad (\text{критерий}$$

Галлилея), $\bar{K} = \frac{r}{c \cdot \Delta t}$ (критерий, введённый

Кутателадзе) выражаются так:

$$\psi = \frac{\overline{Nu}_m}{(\overline{Ga}_m \cdot \overline{Pr}_m)^{1/4}} = \bar{\alpha} \cdot \left(\frac{\nu_m^2}{\lambda_m^2 \cdot \gamma_m^2 \cdot c_m} \right)^{1/4},$$

$$\theta = \frac{\overline{K}_m}{(\overline{Ga}_m \cdot \overline{Pr}_m)^{1/4}} = \frac{r}{\Delta t \cdot l_0} \left(\frac{\nu_m \cdot \lambda_m}{c_m^4 \cdot \gamma_m^2} \right)^{1/4},$$

где l_0 — характерный линейный размер, т. е. для горизонтальной трубы диаметр d , а для вертикальной трубы её высота H .

Результаты обработки опытных данных привели Кутателадзе и Шренцеля к следующим зависимостям:

при $\theta > \theta_{кр} = 128 \cdot 10^{-5}$

$$\psi = 1,13 \cdot \theta^{1/4}, \text{ или } \overline{Nu}_m = 1,13 \sqrt[4]{\overline{Ga}_m \cdot \overline{Pr}_m \cdot \overline{K}_m};$$

при $\theta < \theta_{кр} = 128 \cdot 10^{-5}$

или $\psi = 0,16 + 41,96\theta$,

$$\bar{Nu}_m = 0,16 (\bar{Ga}_m \cdot \bar{Pr}_m)^{1/2} + 41,9 \bar{K}_m.$$

Теплоотдача при кипении жидкости

Опытные данные Якоба, Фритца и Линке, относящиеся к условиям парообразования, когда вода полностью покрывает поверхность нагрева и водяное пространство над поверхностью нагрева достаточно велико для свободного подъёма образующихся пузырьков пара, дают следующие зависимости для критериев:

$$\text{для } 10^3 < \bar{Gr}_m \cdot \bar{Pr}_m < 2 \cdot 10^7$$

$$\bar{Nu}_m = 0,555 (\bar{Gr}_m \cdot \bar{Pr}_m)^{1/4};$$

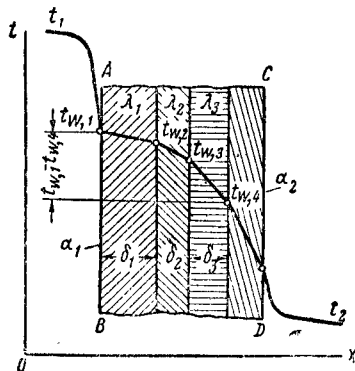
$$\text{для } 2 \cdot 10^7 < \bar{Gr}_m \cdot \bar{Pr}_m < 1 \cdot 10^{12}$$

$$\bar{Nu}_m = 0,129 (\bar{Gr}_m \cdot \bar{Pr}_m)^{1/2},$$

причём определяющей температурой принимается средняя между температурой стенки и температурой насыщенного пара, а физические параметры, входящие в критерии, берутся для воды.

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА КОНДУКЦИЕЙ И КОНВЕКЦИЕЙ

Распространённой технической задачей является теплопередача от одной жидкой (газообразной) среды через твёрдую стенку к другой жидкой (газообразной) среде, т. е. механизм теплопередачи охватывает и конвекцию и кондукцию.



Фиг. 61

Плоская стенка (фиг. 61). Плоская многослойная (n слоёв) стенка, температурное поле в ней определяется теми же условиями, что и в случае задачи о кондукции теплоты. Поверхность $A-B$ омывается подвижной средой с температурой t_1 при коэффициенте теплоотдачи α_1 ; поверхность $C-D$ — средой с температурой t_2 при коэффициенте теплоотдачи α_2 . Количество теплоты, передаваемое через поверхность F м²

$$Q = k \cdot F (t_1 - t_2);$$

коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{час}} \right];$$

термическое сопротивление теплопередаче

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \left[\frac{\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{час}}{\text{ккал}} \right]$$

составляется из следующих величин:

$\frac{1}{\alpha_1}$ — сопротивление теплоотдаче от левой среды к стенке;

$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ — сумма сопротивлений кондукции в отдельных слоях;

$\frac{1}{\alpha_2}$ — сопротивление теплоотдаче от стенки к правой подвижной среде;

$\frac{Q}{F} = q \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}} \right]$ — удельный тепловой поток.

Соотношения между температурами:

$$t_{w,1} = t_1 - \frac{q}{\alpha_1}, \quad t_{w,n+1} = t_2 + \frac{q}{\alpha_2};$$

$$t_{w,i+1} = t_1 - q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^i \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right);$$

$$t_{w,i} = t_2 + q \left(\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right).$$

Для однослойной стенки

$$t_{w,1} = t_1 - \frac{q}{\alpha_1} = t_2 + q \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} \right);$$

$$t_{w,2} = t_2 + \frac{q}{\alpha_2} = t_1 - q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} \right).$$

Круглая цилиндрическая стенка (труба).

В круглой цилиндрической многослойной стенке (трубе) поле температур определяется условиями, совпадающими с таковыми в задаче о кондукции. Внутренняя поверхность омывается подвижной средой с температурой t_1 при коэффициенте теплоотдачи α_1 , внешняя — с температурой t_2 при α_2 .

Количество теплоты, передаваемое через участок трубы длиной L [м]

$$Q = k_{mp} \cdot \pi \cdot L (t_1 - t_2) [\text{ккал/час}];$$

коэффициент теплопередачи трубы

$$k_{mp} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2 \lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}}.$$

$\frac{1}{k_{mp}}$ — сопротивление теплопередаче в трубе.

Часовой тепловой поток, отнесённый к 1 пог. м трубы,

$$q = \frac{Q}{L} = k_{mp} \cdot \pi (t_1 - t_2) \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час}} \right].$$

Температура на стыке i -го и $(i+1)$ -го слоёв

$$\begin{aligned} t_{w, i+1} &= t_1 - \frac{q}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \dots \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right) = \\ &= t_2 + \frac{q}{\pi} \left(\frac{1}{2\lambda_{i+1}} \ln \frac{d_{i+2}}{d_{i+1}} \right) + \dots \\ &\quad \dots + \frac{1}{2\lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}} \Big). \end{aligned}$$

Температуры внутренней и наружной поверхностей

$$t_{w, 1} = t_1 - \frac{q}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1};$$

$$t_{w, n+1} = t_2 + \frac{q}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}.$$

Труба однослойная ($n=1$);

$$t_{w, 1} = t_1 - \frac{q}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1};$$

$$t_{w, 2} = t_2 + \frac{q}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}.$$

Распределение температур в слое см. выше кондукцию.

Средний температурный напор. При расчёте теплообменных устройств (теплопередача Ж—Т—Ж) различают относительное направление жидкостей, омывающих поверхности твёрдой стенки: прямоток $\frac{I}{II}$ — параллельное движение жидкостей в одном направлении; противоток $\frac{I}{II}$ — параллельное движение жидкостей в прямо противоположном направлении; перекрёстный ток $\frac{I}{II}$ — движение жидкостей в перекрёстном направлении; возможны сложные комбинированные схемы движения жидкостей.

При теплопередаче Ж—Т—Ж температуры жидкостей, участвующих в теплообмене, остаются неизменными в случаях, когда осуществляющийся теплообмен вызывает изменение агрегатного состояния (парообразование, конденсацию), в прочих случаях температура горячей t_1 и температура холодной t_2 жидкостей меняются. Схемы характера изменения температур при прямо- и противотоке показаны на фиг. 62; на схемах индекс (') означает вход, (") — выход жидкости; ϑ_1 — разность температур горячей и холодной жидкостей со стороны входа (начальная разность температур); ϑ_2 — разность температур со стороны выхода (конечная разность температур).

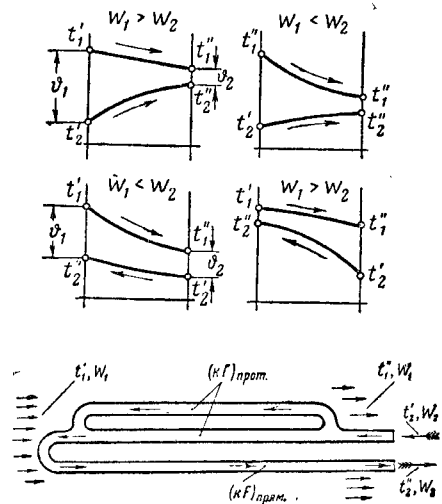
Водяной эквивалент жидкости $W = G \cdot c \left[\frac{\text{ккал}}{\text{час} \cdot \text{град}} \right]$ подсчитывается как про-

изведение часового количества жидкости, протекающей через теплообменник, на теплоёмкость её.

При переменных температурах в расчёте теплопередачи Ж—Т—Ж вводят средний температурный напор:

$$\bar{\vartheta}_m = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\ln \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2}} = \vartheta_1 \frac{1 - \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}}{\ln \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2}} = \vartheta_1 \cdot \varphi \left(\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} \right);$$

значения $\varphi \left(\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} \right)$ см. табл. 63.



Фиг. 62

Перекрёстный ток [2]:

$$\bar{\vartheta}_m = - \frac{\Delta t_1}{\ln \left[1 + \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \ln \left(1 + \frac{\Delta t_2}{t'_1 - t'_2} \right) \right]},$$

где t'_1 и t'_2 — начальные температуры внешнего и внутреннего потоков;

Δt_1 и Δt_2 — перепады температур потоков.

Таблица 63

| $\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}$ | $\frac{\vartheta_m}{\vartheta_1}$ | $\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}$ | $\frac{\vartheta_m}{\vartheta_1}$ | $\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}$ | $\frac{\vartheta_m}{\vartheta_1}$ |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0,0025 | 0,167 | 0,10 | 0,391 | 0,50 | 0,722 |
| 0,005 | 0,138 | 0,12 | 0,415 | 0,55 | 0,753 |
| 0,01 | 0,215 | 0,14 | 0,433 | 0,60 | 0,783 |
| 0,02 | 0,251 | 0,16 | 0,458 | 0,65 | 0,812 |
| 0,03 | 0,276 | 0,18 | 0,478 | 0,70 | 0,841 |
| 0,04 | 0,293 | 0,20 | 0,497 | 0,75 | 0,869 |
| 0,05 | 0,317 | 0,25 | 0,542 | 0,80 | 0,897 |
| 0,06 | 0,336 | 0,30 | 0,581 | 0,85 | 0,924 |
| 0,07 | 0,350 | 0,35 | 0,620 | 0,90 | 0,950 |
| 0,08 | 0,364 | 0,40 | 0,655 | 0,95 | 0,975 |
| 0,09 | 0,378 | 0,45 | 0,690 | 1,00 | 1,000 |

$$\frac{\vartheta_m}{\vartheta_1} = \frac{1 - \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}}{\ln \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2}}$$

Сложные схемы см. [22].

Для приближённого учёта потерь во внешнюю среду М. А. Михеев [33] рекомендует в расчёты вводить вместо водяных эквивалентов $W = Gc$ исправленные значения их:

$$W' = W \left(1 \pm \frac{p}{100} \right),$$

где p — потери тепла в процентах по отношению к общему количеству передаваемого тепла (знак минус для горячей, а знак плюс для холодной жидкости).

Н. И. Белоконов предлагает [2] рассматривать сложные схемы как задачу о теплопередаче в U-образном элементе с различным индексом противоточности (p) (фиг. 62).

Условные обозначения (фиг. 62):

t'_1 и t''_1 — температуры входа и выхода внешнего потока;

t'_2 и t''_2 — температуры входа и выхода внутреннего потока;

Δt_1 и Δt_2 — разности температур внешнего Δt_1 и внутреннего Δt_2 потоков (абсолютные величины);

W_1 и W_2 — $\frac{\text{ккал}}{\text{час} \cdot \text{град}}$, водяные эквиваленты внешнего W_1 и внутреннего W_2 потоков;

$t_w = \frac{W_2}{W_1}$ — соотношение водяных эквивалентов потоков;

$kF \frac{\text{ккал}}{\text{час} \cdot \text{град}}$ — водяной эквивалент поверхности теплопередачи U-образного элемента, равный сумме водяных эквивалентов его противоточной $kF_{\text{прот}}$ и прямоточной $kF_{\text{прям}}$ частей:

$$kF = (kF)_{\text{прям}} + (kF)_{\text{прот}};$$

p — индекс противоточности:

$$p = \frac{kF_{\text{прот}}}{kF};$$

Δt — характеристическая разность температур рабочего процесса U-образного элемента:

$$\Delta t = \sqrt{(\Delta t_1 + \Delta t_2)^2 - 4p \Delta t_1 \Delta t_2};$$

W_m — приведённый водяной эквивалент потоков:

$$\frac{1}{W_m} = \sqrt{\left(\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} \right)^2 - \frac{4p}{W_1 W_2}}.$$

Средняя арифметическая разность температур потоков:

$$\begin{aligned} \vartheta_{a, m} &= (t'_1 - t'_2) - \frac{1}{2} (\Delta t_1 + \Delta t_2) = \\ &= \frac{t'_1 + t''_1}{2} - \frac{t'_2 + t''_2}{2}. \end{aligned}$$

Характеристические разности температур потоков (ϑ_1 — наибольшая, ϑ_{II} — наименьшая):

$$\vartheta_1 = \vartheta_{a, m} + \frac{1}{2} \Delta t,$$

$$\vartheta_{II} = \vartheta_{a, m} - \frac{1}{2} \Delta t.$$

Расчётная средняя разность температур процесса теплопередачи:

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_{II}}{\ln \frac{\vartheta_1}{\vartheta_{II}}}$$

(причём $\vartheta_1 > \vartheta_{II} > 0$, $\vartheta_m > 0$).

Критерий выбора схемы теплопередачи:

$$p > \frac{(t'_1 - t'_2)(t'_2 - t''_1)}{\Delta t_1 \Delta t_2}.$$

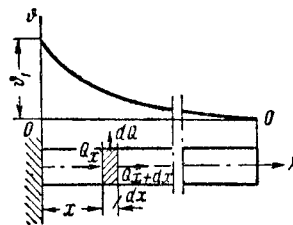
Тепловой баланс теплопередачи:

$$\begin{aligned} Q &= k \cdot F \vartheta_m = W_1 \Delta t_1 = W_2 \Delta t_2 = \\ &= W_m \Delta t \left[\frac{\text{ккал}}{\text{час}} \right] \end{aligned}$$

и

$$Q = \frac{2(t'_1 - t'_2)}{\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} + \frac{1}{W_m} \cdot \text{cth} \left(\frac{1}{2} \frac{kF}{W_m} \right)} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{час}} \right].$$

Стержни и рёбра (фиг. 63). Стержни, цилиндрические тела с произвольным попе-



Фиг. 63

речным сечением $F [м^2]$ и периметром сечения $U [м]$ имеют в одном (начальном) торце избыточную температуру (разность температуры стержня и окружающей среды), поддерживаемую неизменной тепловым потоком $Q [\text{ккал}/\text{час}]$, проходящим через это сечение; распространяясь кондукцией по стержню, поток расходится на теплоотдачу окружающей среде боковой поверхностью и вторым торцом его; ϑ — переменная по длине стержня избыточная температура. Поле температур стационарное, за изотермические поверхности в теле стержня принимаются плоскости, нормальные к оси стержня.

Стержень бесконечной длины ($L = \infty$). Температура стержня на расстоянии x от торца с температурой ϑ_1

$$\vartheta = \vartheta_1 \cdot e^{-x \sqrt{\frac{\alpha U}{\lambda F}}}.$$

$\vartheta_{x=L} = 0$ (температура стержня снизилась до уровня температуры окружающей среды).

Тепловой поток, поступающий в стержень

$$Q = \vartheta_1 \sqrt{\alpha U \lambda F} [\text{ккал}/\text{час}];$$

$\alpha \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{час}} \right]$ — коэффициент теплоотдачи боковой поверхности стержня;

$\lambda \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{град} \cdot \text{час}} \right]$ — коэффициент теплопроводности стержня.

Стержень конечной длины (L м). Температура стержня в сечении, отстоящем от торца с температурой ϑ_1 на расстоянии x ,

$$\vartheta = \vartheta_1 \frac{(1-B) \cdot e^{-m(L-x)} + (1+B) e^{+m(L-x)}}{2 \{ \text{ch}(mL) + B \text{sh}(mL) \}}.$$

Температура конца стержня

$$\vartheta_{x=L} = \frac{\vartheta_1}{\text{ch}(mL) + B \text{sh}(mL)}.$$

Тепловой поток, поступающий в стержень через торец с температурой ϑ_1

$$Q = \lambda F m \vartheta_1 \frac{\text{sh}(mL) + B \text{ch}(mL)}{\text{ch}(mL) + B \text{sh}(mL)}.$$

В формулах: $m = \sqrt{\frac{\alpha L}{\lambda F}}$; $B = \frac{\alpha L}{\lambda \cdot m}$; α_L —

коэффициент теплоотдачи торца в конце стержня;

$\text{ch}(mL) = \frac{e^{mL} + e^{-mL}}{2}$, $\text{sh}(mL) = \frac{e^{mL} - e^{-mL}}{2}$ — гиперболические функции.

Стержень конечной длины L , но не учитывается теплоотдача конечного торца его ($\alpha_L = 0$)

$$\vartheta = \vartheta_1 \frac{e^{-m(L-x)} + e^{+m(L-x)}}{2 \text{ch}(mL)};$$

$$\vartheta_{x=L} = \frac{\vartheta_1}{\text{ch}(mL)};$$

$$Q = \lambda \cdot F \cdot m \cdot \vartheta_1 \cdot \text{th}(mL),$$

где $\text{th}(mL) = \frac{\text{sh}(mL)}{\text{ch}(mL)}$.

охлаждающего воздуха $15-18^\circ \text{C}$ даёт для коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = 1,18 (1 + 0,0075 T_m) V_m^{0,73} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}} \right],$$

где T_m — средняя арифметическая из абсолютных температур ребра и воздуха; V_m — скорость воздуха в км/час.

По Паю [37], в расчёте охлаждения воздухом цилиндров быстроходных двигателей внутреннего сгорания коэффициент теплоотдачи при обдуве оребрённого цилиндра свободным потоком воздуха, параллельным плоскости рёбер, выражается уравнением

$$\alpha = 1,18 (1 + 0,0075 T_m) \cdot \eta_f \cdot V_m^{0,73};$$

здесь α , T_m , V_m — те же, что в формуле Стантона; η_f — к. п. д. (эффективность) ребра, определяемый как отношение тепла, действительно отдаваемого ребром (Q), к теплу, которое ребро могло бы отдать (Q_0), если бы разность температур ребра и воздуха по всей высоте ребра была постоянной (θ_0), равной разности этих температур в корне, ребра.

Для нахождения η_f Пай даёт

$$\eta_f = \frac{Q}{Q_0} = \frac{\text{th } ah'}{ah'};$$

здесь $a = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda \cdot \delta}}$, $h' = h + \frac{\delta}{2}$,

причём δ — толщина ребра;

h — высота его;

Q_0 — тепло, которое могло быть отдано в единицу времени с единицы длины ребра при постоянной разности температур (θ_0) ребра и воздуха,

$$Q_0 = 2 \alpha \theta_0 \cdot h'.$$

Значения a и ah' для двух типов рёбер нормальной (встречающейся в практике) формы и для специальных медных рёбер приведены ниже, в таблице:

| Материал ребра | Высота ребра h в м | Толщина ребра δ в м | Теплопроводность λ | $a = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda \cdot \delta}}$ | h' в м | ah' | к. п. д. η_f |
|--------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|---|----------|-------|-------------------|
| Алюминий | 0,025 | 0,0023 | 190 | 22,8 | 0,0261 | 0,595 | 0,90 |
| Сталь | 0,016 | 0,0008 | 39,6 | 83 | 0,0164 | 1,36 | 0,65 |
| Медь | 0,0254 | 0,00051 | 328 | 36,4 | 0,0256 | 0,93 | 0,79 |

При весьма коротких стержнях, малой длине L

$$\text{ch}(mL) = 1; \text{th}(mL) \approx mL;$$

$$\vartheta_{x=L} \approx \vartheta_1; Q = \vartheta_1 \cdot \alpha \cdot U \cdot L;$$

приведённые формулы стержней применимы для расчёта плоских рёбер, расположенных на плоской плите (стенке).

Стантон на основе опытов с медными расположенными вокруг деревянного цилиндра диаметром 114 мм рёбрами (расстояние между рёбрами 8 мм, толщина их 0,55 мм, наружный диаметр 146 мм), при температуре рёбер $30-150^\circ \text{C}$ и температуре

Величина α принята одинаковой для всех рёбер, равной $108 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$, что соответствует скорости свободного потока, обтекающего поверхность, в 145 км/час.

РАДИАЦИОННАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА (ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ИЗЛУЧЕНИЕМ)

Радиационная теплопередача осуществляется путём переноса энергии электромагнитными волнами, имеющими квантовую природу и подчиняющимися законам термо-

динамики. Лучи, испускаемые излучающим телом, differing длинами волн (λ) и частотами (N), имеют общую природу и представляют собой электромагнитные волны. Деление их на световые лучи, тепловые, химические и другие условно (табл. 64).

Таблица 64

Классификация электромагнитных колебаний

| Наименование волн | Длина волн |
|---|---|
| Космические и гамма-лучи | $\lambda = 0,1$ до 10°Å |
| Лучи Рентгена | $10-200\text{Å}$ |
| Ультрафиолетовые лучи (химические лучи) | $200\text{Å}-0,4\text{ мкм}^{**}$ |
| Видимые (световые) лучи | $0,4-0,76\text{ мкм}$ |
| Инфракрасные (тепловые) лучи | $0,76-400\text{ мкм}$ |
| Электромагнитные волны | $0,4\text{ мм}-\infty\text{ км}$ |

В однородной и изотропной среде лучи распространяются прямолинейно; достигая поверхности среды, они частично отражаются, частично проникают во вторую среду, где частично поглощаются, частично же проходят её насквозь.

Отражение (преломление) называют правильным, если падающий и отражённый (преломлённый) лучи лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности раздела двух сред, а поверхности, дающие такое отражение (преломление), называют абсолютно ровными. Отражение (преломление) называют диффузным, если падающие лучи, отражаясь (преломляясь), расщепляются и идут во всевозможных направлениях; такое отражение дают шероховатые поверхности.

Гладкую поверхность, полностью отражающую все падающие на неё лучи, называют зеркальной; шероховатую поверхность, полностью и равномерно отражающую все падающие лучи, называют белой (абсолютно); шероховатую поверхность, полностью пропускающую все падающие на неё лучи, называют абсолютно чёрной; тело, полностью поглощающее все падающие на него лучи, называют абсолютно чёрным.

$$A + R + D = 1,$$

где A — коэффициент поглощения, поглощательная способность тела, доля излучения, поглощаемая телом; R — коэффициент отражения, отражательная способность тела, доля излучения, отражаемая телом; D — коэффициент проницаемости, пропускная способность, доля излучения, проникающая сквозь тело.

Для абсолютно чёрного тела $A = 1$, для абсолютно белой поверхности $R = 1$.

Приведённые коэффициенты (способности) зависят не только от природы тела, но и от вида лучей (длины волны λ), поэтому соотношение $A_{\lambda} + R_{\lambda} + D_{\lambda} = 1$ даёт указания на свойства тела по отношению к монохроматическому пучку, у которого длина волн в диа-

пазоне от λ до $\lambda + d\lambda$; соотношение $A + R + D = 1$ имеет смысл по отношению к интегральному (полному) излучению, охватывающему волны всех длин.

Если $D = 0$, тело непроницаемо для излучения и $A + R = 1$; если $D = 1$, среда пропускает излучение полностью, она диатермична.

Лучеиспускательную способность тела для интервала длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, т. е. количество энергии монохроматического излучения с единицы поверхности в единицу

времени $E_{\lambda} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}} \right]$, определяют из выраже-

ния $E_{\lambda} = J_{\lambda} \cdot d\lambda$, где $J_{\lambda} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}} \right]$ — интенсивность излучения.

Излучение абсолютно чёрного тела

Интенсивность излучения любого тела $J_{\lambda} = f(T, \lambda)$. Закон Планка (1902 г.) устанавливает вид функции f для абсолютно чёрного тела (индекс s — указание на абсолютное чёрное тело).

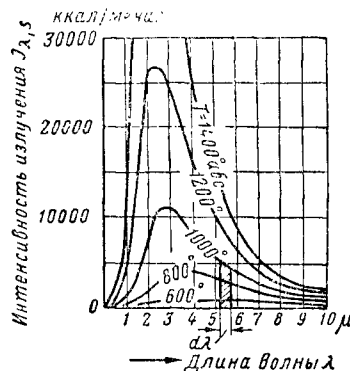
$$J_{\lambda, s} = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}} \right],$$

где T — °абс.; λ — в м;

$$c_1 = 3,17 \cdot 10^{-16} \left[\frac{\text{ккал м}^2}{\text{час}} \right]; c_2 = 1,43 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{град.}$$

(фиг. 64).

Абсолютно чёрное тело испускает лучи всех длин волн от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$ при всех



Фиг. 64

температурах, отличных от абсолютного нуля; при данной температуре интенсивность излучения его больше интенсивности излучения любого другого реального тела в тех же условиях.

При малых значениях $\lambda \cdot T$ по закону излучения Вина

$$J_{\lambda, s} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}},$$

при $e^{\frac{c_2}{\lambda T}} \gg 100$ ошибка по формуле $\gg 1\%$.

*Å — единица измерения длины волны, ангстрем, равная 10^{-7} мм.

** мкм — микрон, равный 10^{-3} мм.

При больших $\lambda \cdot T$ применим закон Рэлея—Джинса

$$J_{\lambda, s} = \frac{c_1}{c_2 \lambda^5} \cdot T.$$

Закон смещения Вина устанавливает связь между длиной волны λ_m , отвечающей максимальному значению интенсивности излучения, и температурой. При повышении температуры в диаграмме $y = J_{\lambda, s}$, $x = \lambda$ максимумы изотерм функции $J_{\lambda, s} = f(\lambda, T)$ смещаются в сторону уменьшения λ (см. фиг. 64):

$$\lambda_m \cdot T = 2,9 \text{ мм} \cdot ^\circ\text{К}.$$

Закон Стефана — Больцмана, установленный Стефаном (1879) экспериментально, Больцманом (1884) теоретически, даёт интегральную, полную лучеиспускающую способность абсолютно чёрного тела:

$$E_s = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} J_{\lambda, s} \cdot d\lambda = \sigma_s \cdot T^4 = c_s \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \left[\frac{\text{к кал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}\right],$$

где σ_s или c_s — коэффициент излучения.

$$\sigma_s = 4,96 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{к кал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot (^\circ\text{абс.})^4} \right];$$

$$c_s = 4,96 \left[\frac{\text{к кал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \left(\frac{^\circ\text{абс.}}{100}\right)^4} \right].$$

Излучение серых тел

Излучение серого тела характеризуется, как и излучение абсолютно чёрного тела, волнами всех длин, от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$. Спектр излучения и здесь непрерывен; однако в сравнении с чёрным телом интенсивность излучения серого тела для каждой длины волны понижена при всех температурах; если J_λ — интенсивность излучения серого тела, то $\frac{J_\lambda}{J_{\lambda, s}} = \varepsilon$, где $\varepsilon < 1$ — степень черноты серого тела, не зависящая ни от длины волны, ни от температуры.

К серым телам применим закон Стефана — Больцмана:

$$E = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} J_\lambda \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4 = c \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \left[\frac{\text{к кал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}\right],$$

где σ и c — коэффициенты излучения, $c = \sigma \cdot 10^8$,

$$c = c_s \cdot \varepsilon = \frac{\text{к кал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \left(\frac{^\circ\text{абс.}}{100}\right)^4} \text{ (см. табл. 65)}.$$

Большинство технических твёрдых тел достаточно близко подходит под понятие серого тела; коэффициент излучения их зависит не только от природы тела, но и от состояния поверхности. Отклонение от закона (зависимость c от температуры) учитывается обычно ссылкой на интервал температур, для которого найдено значение c .

Таблица 65

Степень черноты полного нормального излучения различных поверхностей [28]

| Поверхность | $^\circ\text{C}$ | ε |
|---|------------------|---------------|
| А. Металлы и их окислы | | |
| Алюминий | | |
| Тщательно полированная пластина, чистого металла 98,3% | 225—575 | 0,039—0,057 |
| Полированная пластина | 23 | 0,040 |
| Шероховатая пластина | 26 | 0,055 |
| Окисленный при 600° С | 200—600 | 0,11—0,19 |
| Кровельный материал, крытый алюминием | 13 | 0,216 |
| Поверхности, обработанные алюминием, при нагреве до 600° С: | | |
| медь | 200—600 | 0,18—0,19 |
| сталь | 200—600 | 0,52—0,57 |
| Вольфрам | | |
| Нить, бывшая в употреблении | 25—3300 | 0,032—0,35 |
| Нить | 3300 | 0,39 |
| Железо и сталь | | |
| <i>Металлические поверхности (или с очень тонким слоем окисла)</i> | | |
| Железо электролитное, тщательно полированное | 175—225 | 0,052—0,074 |
| Железо полированное | 425—1020 | 0,144—0,377 |
| То же свежеработанное наждаком | 20 | 0,242 |
| Чугун полированный | 200 | 0,21 |
| Железо сварочное, тщательно полированное | 40—250 | 0,28 |
| Чугун свежерасплавленный | 22 | 0,435 |
| Стальное литьё полированное | 770—1040 | 0,52—0,56 |
| Сталь листовая шлифованная | 940—1100 | 0,52—0,61 |
| Железо листовое гладкое | 900—1040 | 0,55—0,60 |
| Чугун обточенный | 830—990 | 0,60—0,70 |
| Окисленные поверхности | | |
| Железная пластина, травленая и потом докрасна заржавевшая | 20 | 0,612 |
| То же, но совершенно заржавевшая | 20 | 0,685 |
| Сталь листовая прокатанная | 20 | 0,057 |
| Железо окислённое | 100 | 0,735 |
| Чугун, окислённый при 600° С | 200—600 | 0,64—0,78 |
| Сталь, окислённая при 600° С | 2 600—600 | 0,79 |
| Железо электролитное, окислённое, гладкое | 125—525 | 0,78—0,82 |
| Окись железа | 500—1200 | 0,85—0,89 |
| Железо литее необработанное | 925—1115 | 0,87—0,95 |
| Сталь листовая со значительным шероховатым слоем окиси | 25 | 0,80 |
| Сталь листовая с плотным блестящим слоем окиси | 25 | 0,82 |
| Пластина литая гладкая | 23 | 0,80 |
| То же шероховатая | 23 | 0,82 |
| Чугун шероховатый, сильно окислённый | 40—250 | 0,95 |
| Железо сварочное, окислённое, тусклое | 20—360 | 0,94 |
| Пластина стальная шероховатая | 40—370 | 0,94—0,97 |
| Сплавы стальные высокотемпературные (см. «Сплавы никеля») | | |

Продолжение табл. 65

| Поверхность | °C | ϵ_n |
|--|---------------------------|--------------------------------------|
| Расплавленный металл | | |
| Чугун расплавленный | 1300—1400 | 0,29—0,29 |
| Сталь мягкая расплавленная | 1600—1800 | 0,28—0,28 |
| Золото | | |
| Чистое, тщательно полированное | 225—625 | 0,018—0,035 |
| Латунь | | |
| Тщательно полированная, состав по весу: 73,2% Cu; 26,7% Zn; 62,4% Cu; 36,8% Zn; 0,4% Pb; 0,3% Al; 82,9% Cu; 17,0% Zn | 245—355 255—375 275 | 0,028—0,031 0,0388—0,037 0,030 |
| Прокатанная в твердом состоянии, полированная, но притом: а) направление полировки заметно б) со слегка нарушенной полировкой в) со следами оставшегося от полировки стеарина | 20 23 24 | 0,038 0,043 0,053 |
| Полированная | 40—315 | 0,096 |
| Пластина прокатанная: а) с естественной поверхностью б) тертая грубым наждаком | 22 22 | 0,06 0,20 |
| Пластина тусклая | 50—350 | 0,22 |
| Окисленная при нагреве до 600° C | 200—600 | 0,61—0,59 |
| Медь | | |
| Тщательно полированная, электролитная | 80 | 0,013 |
| Торговая шлифованная, полированная, но с оставшимися ямками | 20 | 0,030 |
| Шабренная до блеска, но не зеркальная | 22 | 0,072 |
| Полированная | 115 | 0,023 |
| Пластина, предварительно нагретая до 600° C | 200—600 | 0,57—0,57 |
| Окись меди | 800—1100 | 0,66—0,54 |
| Пластина, продолжительно нагревавшаяся, покрытая толстым слоем окиси | 25 | 0,78 |
| Расплавленная | 1075—1275 | 0,16—0,13 |
| Молибденовая нить | 725—2600 | 0,096—0,292 |
| Никель | | |
| Нанесенный гальванопластическим способом на полированное железо и затем полированный | 23 | 0,045 |
| Технически чистый (98,9% Ni по весу + 1 Mn), полированный | 225—375 | 0,07—0,037 |
| Никелированное травленое железо, неполированное | 20 | 0,11 |
| Проволока | 185—1000 | 0,096—0,186 |
| Пластина, окисленная при нагреве до 600° C | 200—600 | 0,37—0,43 |
| Окись никеля | 650—1255 | 0,59—0,86 |
| Сплавы никеля | | |
| Ni—Cu, окисленный при 600° C | 200—600 | 0,41—0,46 |
| Cr—Ni (по весу 18—32% Ni, 55—68% Cu, 20% Zn), окисленный серый | 20 | 0,262 |

Продолжение табл. 65

| Поверхность | °C | ϵ_n |
|--|-----------|----------------|
| Сплав со сталью (8% Ni, 18% Cr), слегка серебристый, шероховатый, коричневый после нагревания | 215—490 | 0,44—0,36 |
| То же после 24-часового нагрева при 525° C | 215—525 | 0,62—0,73 |
| Сплав (20% Ni, 25% Cr), бурый загрязненный, окисленный от времени | 215—525 | 0,90—0,97 |
| Сплав (60% Ni, 12% Cr), гладкий, черный, с прочной окисной оболочкой от времени | 270—560 | 0,89—0,82 |
| Олово, блестящее луженое листовое железо | 25 | 0,043—0,064 |
| Платина | | |
| Чистая полированная пластина | 225—625 | 0,054—0,104 |
| Лента | 925—1115 | 0,112—0,17 |
| Нить | 25—1230 | 0,036—0,192 |
| Проволока | 225—1375 | 0,073—0,182 |
| Ртуть, очень чистая | 0—100 | 0,09—0,12 |
| Свинец | | |
| Чистый (99,96%), не окисленный | 125—225 | 0,057—0,075 |
| Серый, окисленный | 24 | 0,281 |
| Окисленный при 200° C | 200 | 0,63 |
| Серебро | | |
| Полированное, чистое | 225—625 | 0,019—0,0324 |
| Полированное | 38—370 | 0,0221—0,0312 |
| Сталь см. Железо | | |
| Танталовая нить | 1325—2525 | 0,193—0,31 |
| Хром см. в «Сплавах никеля» никельхромовую сталь | | |
| Цинк | | |
| Продажный (99,1%), полированный | 225—325 | 0,045—0,053 |
| Окисленный при нагреве до 400° C | 400 | 0,11 |
| Оцинкованное листовое железо: а) очень блестящее б) серое, окисленное | 23 24 | 0,228 0,276 |
| Б. Огнеупорные, строительные, красильные и другие материалы | | |
| Асбестовый картон | 24 | 0,96 |
| Асбестовая бумага | 40—370 | 0,93—0,945 |
| Бумага тонкая | | |
| Наклеенная на луженую железную пластину | 19 | 0,921 |
| Наклеенная на шероховатую железную пластину | 19 | 0,929 |
| Наклеенная на лакированную черным пластину | 19 | 0,944 |
| Вода | 0—100 | 0,95—0,963 |
| Гипс, слой толщиной 0,5 мм на гладкой или зачерненной пластине | 20 | 0,903 |
| Дуб строганный | 20 | 0,895 |
| Кварц плавленый, шероховатый | 20 | 0,932 |
| Кирпич | | |
| Красный шероховатый, но без больших неровностей | 20 | 0,93 |
| Динасовый глазурованный, шероховатый | 1100 | 0,85 |

Полусферическое излучение, излучение в полупространство

$$Q_{\lambda} = J \cdot d_{\lambda} \cdot dF \int_0^{\pi} \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi \int_0^{2\pi} dX = \\ = \pi \cdot E_{\lambda} \cdot dF.$$

Нормальное излучение, т. е. излучение в направлении нормали к dF ($\varphi = 0$), относенное к единице пространственного угла,

$$Q_{\lambda, n} = E_{\lambda} \cdot dF.$$

Теплообмен излучением между поверхностями твёрдых тел, разделённых непоглощающей средой. Расчётная формула

$$Q = 4,9 \cdot F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \psi \cdot \varepsilon',$$

где Q — результирующий расход теплоты в ккал/час;

F — площадь одной из поверхностей в m^2 с соответственным частному случаю подстрочным индексом 1 или 2;

ψ — угловой коэффициент, учитывающий средний угол, под которым одна поверхность видит другую;

ε' — приведённая степень черноты, являющаяся функцией от индивидуальных степеней черноты поверхностей (табл. 66).

Коэффициент 4,9 в $\frac{\text{ккал}}{m^2 \cdot \text{час} \left(\frac{^\circ \text{абс}}{100} \right)^4}$.

Защита от излучения экранами

Экран — обычно металлический лист, установленный между двумя стенками, участвующими в теплообмене излучением, их температуры T_1 и T_2 ; $T_1 > T_2$; расстояние между стенками достаточно мало по отношению к размерам стенок, чтобы можно было пренебречь потерями от рассеивания энергии в боковых направлениях. Температура на обеих поверхностях экрана T_3 . При решении предполагается, что температура экрана с момента установки его начинает расти до некоторого значения T_3 , далее она остаётся неизменной, а следовательно, экран перестаёт аккумулировать теплоту и должен далее всю воспринятую от поверхности I теплоту передать поверхности II.

Первый случай. Коэффициенты излучения стенки 1, стенки 2 и экрана равны между собой

$$c_1 = c_2 = c_3.$$

Приведённые коэффициенты излучения будут

$$c_{1 \rightarrow 3} = c_{3 \rightarrow 2} = c_{1-2} = \frac{1}{\frac{2}{c} - \frac{1}{c_s}}.$$

Количество теплоты, отдаваемое единицей поверхности в единицу времени при отсутствии экрана.

$$q_0 = \frac{1}{\frac{2}{c} - \frac{1}{c_s}} \cdot \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\} \left[\frac{\text{ккал}}{m^2 \cdot \text{час}} \right];$$

то же при наличии экрана и при установившемся режиме температур:

Таблица 66

Множители в формуле лучеиспускания между твёрдыми телами

| Случай | Конфигурация поверхностей, между которыми происходит теплообмен лучеиспусканием | Поверхность F | Угловой коэффициент ψ | Приведённая степень черноты ε' | Примечание |
|--------|--|-----------------|----------------------------|--|--|
| 1 | Бесконечные параллельные пластины | Любая | 1 | $\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$ | 1. Если в формуле употребляется площадь F_1 , то поверхность внутреннего тела не должна иметь отрицательной кривизны. В случае же наличия таковой надо, определяя F_1 , мысленно перекрыть все углубления в поверхности плоскостями, которым присвоить степень черноты, повышенную (более близкую к единице) сравнительно с ε_1 в прямой зависимости от глубины вогнутостей. 2. Первая форма получается, если принимать отражение полностью рассеянным, вторая же получается при идеально зеркальном отражении. Истинное значение ближе к первой форме, чем ко второй. Более сложные случаи см. [28] |
| 2 | Малое тело, заключённое внутри полностью охватывающего его большого тела (индекс 1 относится к внутреннему телу) | F_1 | 1 | ε_1 | |
| 3 | Тело, заключённое внутри полностью охватывающего его большого тела величины одного с ним порядка (индекс 1 относится к внутреннему телу) | F_1 | 1 | $\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$ | |
| 4 | Промежуточный случай между 2 и 3 (не поддаётся точному учёту за исключением тел особой формы) | F_1 | 1 | $\varepsilon_1 > \varepsilon' > \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$ | |
| 5 | Концентрические шары или бесконечные цилиндры, особый вид случая 4 (индексы 1 относятся к внутренним телам, 2 — к охватывающим) | F_1 | 1 | $\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1 / (1/\varepsilon_2 - 1)}{F_2}}$ или $\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$ | |
| | | | | (см. примечание 2) | |

$$q_{1 \rightarrow 2} = q_{2 \rightarrow 1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\frac{2}{c} - \frac{1}{c_s}} \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\},$$

$$\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\},$$

т. е. установка одного экрана снижает теплопередачу в 2 раза. Если q_n — теплопередача при n поставленных друг за другом экранов, то

$$q_n = \frac{1}{n+1} \cdot q_0.$$

Второй случай. $c_1 = c_2 = c$; $c_3 \neq c$.
Приведённые коэффициенты излучения:

$$c_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{\frac{2}{c} - \frac{1}{c_s}}, \quad c_{1 \rightarrow 3} = \frac{1}{\frac{1}{c} + \frac{1}{c_3} - \frac{1}{c_s}} = c_{2 \rightarrow 3};$$

$$q_{1 \rightarrow 2} = q_{2 \rightarrow 1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{c} + \frac{1}{c_3} - \frac{1}{c_s}} \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\};$$

$$\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\};$$

$$q_0 = \frac{1}{\frac{2}{c} - \frac{1}{c_s}} \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\};$$

$$q_{1 \rightarrow 2} = q_{2 \rightarrow 1} = \frac{1}{2} \frac{\frac{2}{c} - \frac{1}{c_s}}{\frac{1}{c} + \frac{1}{c_3} - \frac{1}{c_s}} \cdot q_0.$$

Излучение газов

Газы обладают селективной поглощательной способностью, а следовательно, и селективной испускательной способностью; у твердых тел поглощение происходит в тонком поверхностном слое, у газов за счёт большей прозрачности для тепловых лучей следует учитывать объёмное поглощение.

Поглощательная способность A_λ по отношению к волнам длиной от λ до $\lambda + d\lambda$ для газа сложная функция от λ ; она зависит не только от свойств среды (газа), но и от формы и размера газового тела.

В объёме газового тела в зависимости от давления содержится различное число молекул, поэтому поглощение газовым объёмом луча, проникающего на глубину s (зависящую от формы и размера), будет зависеть не только от глубины проникновения, но и от давления газа; так как обычно приходится иметь дело с газовыми объёмами, заполненными смесями газов, то, говоря о поглощении каким-либо компонентом смеси, считают A_λ

зависящим от произведения $s \cdot \frac{p}{P}$, где p — парциальное давление компонента; P — давление смеси газов.

Энергия излучения, испускаемого газовым телом,

$$Q = A_\lambda^{\lambda + \Delta\lambda} \cdot F \int_\lambda^{\lambda + \Delta\lambda} J_{\lambda,s} \cdot d\lambda;$$

подсчёт по этой формуле должен быть произведён для каждой полосы поглощения; суммирование всех этих величин даст полное излучение газового тела.

Газы с симметричным строением молекул (водород, кислород, азот и др.) не обнаруживают полос поглощения, достаточных для учёта их при встречающихся в технике температурах; окись углерода, углеводороды, водяной пар, углекислота, сернистый ангидрид, аммиак, хлористый водород имеют полосы поглощения, достаточно развитые.

По Шаку [47], лучеиспускание углекислоты и водяного пара в топочных газах учитывается следующими формулами.

Для углекислоты:

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{C}{4,95} \left[\varphi_1 (k_1 - k_1') \left(1 - \frac{1 - e^{-16c}}{16c} \right) + (k_2 - k_2') + \varphi_2 (k_3 - k_3') \left(1 - \frac{1 - e^{-80c}}{80c} \right) \right] \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}} \right].$$

Здесь $c = p \cdot s$ (формула действительна при $c > 0,01$); p — парциальное давление CO_2 (в ат); s — толщина в м лучеиспускающего слоя топочных газов над лучевоспринимающей поверхностью F в м^2 .

Величины k выражают лучеиспускание отдельных полос поглощения бесконечно толстого слоя углекислоты (берутся из табл. 67).

Таблица 67

Уменьшенное лучеиспускание бесконечно толстого слоя углекислоты [47]

| Температура в °C | Лучеиспускание | | |
|---------------------|---|---|---|
| | полоса 1 k_1 в $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}$ | полоса 2 k_2 в $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}$ | полоса 3 k_3 в $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}$ |
| 200 | $0,004 \cdot 10^3$ | $0,07 \cdot 10^3$ | $0,23 \cdot 10^3$ |
| 300 | $0,05 \cdot 10^3$ | $0,24 \cdot 10^3$ | $0,36 \cdot 10^3$ |
| 400 | $0,15 \cdot 10^3$ | $0,52 \cdot 10^3$ | $0,50 \cdot 10^3$ |
| 500 | $0,24 \cdot 10^3$ | $0,95 \cdot 10^3$ | $0,65 \cdot 10^3$ |
| 600 | $0,36 \cdot 10^3$ | $1,6 \cdot 10^3$ | $0,79 \cdot 10^3$ |
| 700 | $1,9 \cdot 10^3$ | $2,4 \cdot 10^3$ | $0,90 \cdot 10^3$ |
| 800 | $3,2 \cdot 10^3$ | $3,3 \cdot 10^3$ | $1,1 \cdot 10^3$ |
| 900 | $4,8 \cdot 10^3$ | $4,3 \cdot 10^3$ | $1,3 \cdot 10^3$ |
| 1000 | $6,8 \cdot 10^3$ | $5,5 \cdot 10^3$ | $1,4 \cdot 10^3$ |
| 1100 | $9,3 \cdot 10^3$ | $6,8 \cdot 10^3$ | $1,6 \cdot 10^3$ |
| 1200 | $12,3 \cdot 10^3$ | $8,2 \cdot 10^3$ | $1,9 \cdot 10^3$ |
| 1300 | $15,6 \cdot 10^3$ | $9,7 \cdot 10^3$ | $2,1 \cdot 10^3$ |
| 1400 | $19,2 \cdot 10^3$ | $11,2 \cdot 10^3$ | $2,4 \cdot 10^3$ |
| 1500 | $23 \cdot 10^3$ | $12,9 \cdot 10^3$ | $2,7 \cdot 10^3$ |
| 1600 | $28 \cdot 10^3$ | $14,6 \cdot 10^3$ | $3,0 \cdot 10^3$ |
| 1700 | $33 \cdot 10^3$ | $16,6 \cdot 10^3$ | $3,4 \cdot 10^3$ |
| 1800 | $38 \cdot 10^3$ | $18,7 \cdot 10^3$ | $3,8 \cdot 10^3$ |
| 1900 | $44 \cdot 10^3$ | $21,0 \cdot 10^3$ | $4,2 \cdot 10^3$ |
| 2000 | $51 \cdot 10^3$ | $24 \cdot 10^3$ | $4,5 \cdot 10^3$ |

k берётся по температуре газа; k' — по температуре лучевоспринимающей поверхности;

$C \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}} \left(\frac{^\circ\text{K}}{100} \right)^4 \right]$ — коэффициент излучения

лучевоспринимающей поверхности; коэффициенты φ — поправочные, зависят от c и фор-

мы газового тела; для округлённых коротких форм (куб, шар) $\varphi = 0,7 - 0,8$, для плоских, вытянутых форм $\varphi = 1,1 - 1,0$; первые значения соответствуют малым c , вторые — большим; при $c \geq 0,5$ все значения φ равны 1; φ_s должно быть ближе к 1, чем φ_1 ; практически разница между φ_1 и φ_s в большинстве случаев незначительна; при $c < 0,01$ и при $\text{CO}_2 < 2\%$ применяется формула

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{C}{4,95} \left[\varphi_1 (k_1 - k_1') \left(1 - \frac{1 - e^{-16c}}{16c} \right) + \right. \\ \left. + 0,7 \varphi_s (k_s - k_s') \left(1 - \frac{1 - e^{-1800c}}{1800c} \right) + \right. \\ \left. + 0,45 \varphi_s (k_s - k_s') \left(1 - \frac{1 - e^{-80c}}{80c} \right) \right] \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}} \right].$$

Коэффициент φ_s принимают равным φ_1 .
Для водяного пара:

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{C}{4,95} \left\{ \varphi_1 (W_1 - W_1') \left(1 - \frac{1 - e^{-8c}}{8c} \right) + \right. \\ \left. + \varphi_s (W_s - W_s') \times \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow \times \left[1 - \frac{0,66}{5c} (1 - e^{-5c}) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{0,34}{22c} (e^{-5c} - e^{-27c}) \right] + \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow + \varphi_s (W_s - W_s') \left(1 - \frac{1 - e^{-45c}}{45c} \right) \right\} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{час}} \right],$$

значения φ оцениваются так же, как и для углекислоты; лучеиспускания отдельных полос водяного пара W_1, W_2, W_3 берутся из таблицы по температуре газа; W_1, W_2, W_3 — то же, но по температуре лучеиспущающей поверхности (табл. 68).

Таблица 68

Лучеиспускание бесконечно толстого слоя
водяного пара

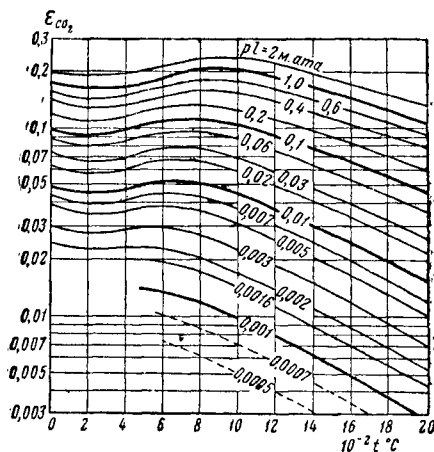
| Температура $t, ^\circ\text{C}$ | Лучеиспускание | | |
|------------------------------------|---|---|---|
| | полоса 1 2,24—3,27 μ | полоса 2 4,8—8,6 μ | полоса 3 12—25 μ |
| | W_1 в $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}$ | W_2 в $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}$ | W_3 в $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}$ |
| 200 | $0,02 \cdot 10^3$ | $0,96 \cdot 10^3$ | $7 \cdot 10^3$ |
| 300 | $0,25 \cdot 10^3$ | $2,2 \cdot 10^3$ | $0,9 \cdot 10^3$ |
| 400 | $0,85 \cdot 10^3$ | $3,9 \cdot 10^3$ | $1,2 \cdot 10^3$ |
| 500 | $2,5 \cdot 10^3$ | $6,1 \cdot 10^3$ | $1,4 \cdot 10^3$ |
| 600 | $5,0 \cdot 10^3$ | $9,0 \cdot 10^3$ | $1,7 \cdot 10^3$ |
| 700 | $9,4 \cdot 10^3$ | $12,2 \cdot 10^3$ | $2,0 \cdot 10^3$ |
| 800 | $15,3 \cdot 10^3$ | $15,8 \cdot 10^3$ | $2,35 \cdot 10^3$ |
| 900 | $23,5 \cdot 10^3$ | $19,6 \cdot 10^3$ | $2,7 \cdot 10^3$ |
| 1000 | $33,8 \cdot 10^3$ | $23,3 \cdot 10^3$ | $3,0 \cdot 10^3$ |
| 1100 | $46 \cdot 10^3$ | $27,2 \cdot 10^3$ | $3,4 \cdot 10^3$ |
| 1200 | $61 \cdot 10^3$ | $31,4 \cdot 10^3$ | $3,7 \cdot 10^3$ |
| 1300 | $78 \cdot 10^3$ | $35,6 \cdot 10^3$ | $4,1 \cdot 10^3$ |
| 1400 | $97 \cdot 10^3$ | $40,1 \cdot 10^3$ | $4,5 \cdot 10^3$ |
| 1500 | $117 \cdot 10^3$ | $44,6 \cdot 10^3$ | $4,9 \cdot 10^3$ |
| 1600 | $139 \cdot 10^3$ | $49,4 \cdot 10^3$ | $5,3 \cdot 10^3$ |
| 1700 | $161 \cdot 10^3$ | $54,4 \cdot 10^3$ | $5,8 \cdot 10^3$ |
| 1800 | $185 \cdot 10^3$ | $59,5 \cdot 10^3$ | $6,2 \cdot 10^3$ |
| 1900 | $211 \cdot 10^3$ | $64,9 \cdot 10^3$ | $6,7 \cdot 10^3$ |
| 2000 | $239 \cdot 10^3$ | $71 \cdot 10^3$ | $7,1 \cdot 10^3$ |

В работах Шака для пользования приведёнными формулами даются графики, облегчающие расчёты. Другие методы расчёта

излучения несветящимися газами см. [22], [24], [28], [47].

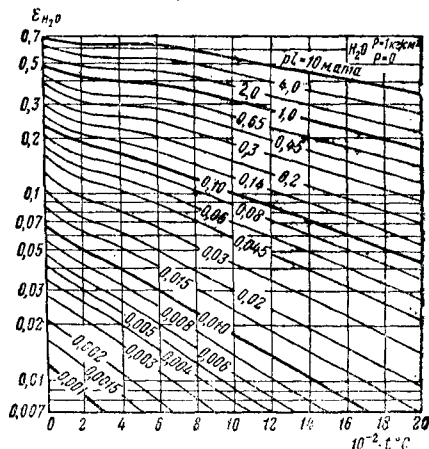
Для углекислоты и водяного пара имеются теперь более надёжные данные, полученные путём непосредственного измерения общей энергии излучения газа.

Они показывают, что излучение углекислоты пропорционально $T^{3,5}$, а излучение водяного пара T^3 . Однако для решения тех-



Фиг. 66

нических задач расчётным формулам условно придают вид, согласный с законом Стефана—Больцмана, внося соответственные поправки.



Фиг. 67

Окончательная расчётная формула лучистого теплообмена [33] между газом и оболочкой

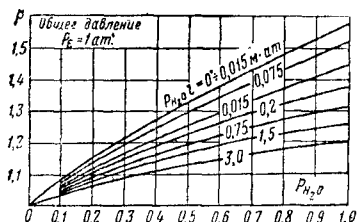
$$q_{g,w} = \epsilon_w \cdot C_s \left[\epsilon_g \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \right. \\ \left. - A_g \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}},$$

где ϵ_g — степень черноты газа, функция температуры газа и произведения из парциального давления газа p и длины пути луча l ; $\epsilon_g = f(T_g, pl)$ берётся по фиг. 66 для углекислоты и по фиг. 67 для водяного пара.

Значение $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$, взятое по фиг. 67, умножают на коэффициент β , взятый по фиг. 68. Если углекислота и водяной пар содержатся одновременно, то ϵ_g находят по выражению

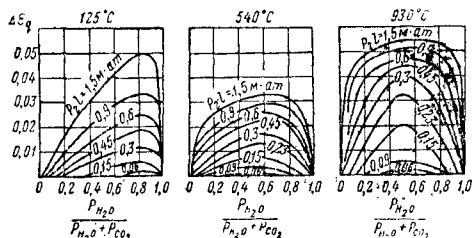
$$\epsilon_g = \epsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta\epsilon_g,$$

где $\Delta\epsilon_g$ — поправка на частичное взаимопоглощение энергии, излучённой углекислотой и водяным паром.



Фиг. 68

$\Delta\epsilon_g$ невелико, порядка 2—4%, учитывается при очень точных расчётах, берётся по фиг. 69.



Фиг. 69

Если степень черноты твёрдой поверхности (оболочки, обнимающей газ) ϵ_w , то эффективная степень черноты её в присутствии газа будет приблизительно (при $\epsilon_w = 0,8 - 1,0$) $\epsilon_w = 0,5(\epsilon_w + 1)$.

$A_g = A_{\text{CO}_2} + A_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta A_g$ — поглощательная способность газа, берётся по температуре оболочки t_w С, причём

$$A_{\text{CO}_2} = \epsilon_{\text{CO}_2} \cdot \left(\frac{T_g}{T_w}\right)^{0,65} \text{ — берётся по фиг. 66}$$

по t_w ,

$A_{\text{H}_2\text{O}} = \beta \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ — берётся по t_w из фиг. 67 и 68,

$$\Delta A_g = \Delta\epsilon_g \text{ — берётся по фиг. 69.}$$

Таблица 69

Средняя длина пути луча для газовых тел различной формы [33]

| Формы газового тела | l |
|---|--------------|
| Сфера диаметром d | $0,60 d$ |
| Куб со стороной a | $0,60 a$ |
| Цилиндр диаметром d , бесконечно длинный | $0,90 d$ |
| Цилиндр высотой $h = d$, излучение на боковую поверхность | $0,60 d$ |
| То же, излучение на центр основания | $0,77 d$ |
| Цилиндр $h = \infty$, основание — полукруг радиусом r , излучение на плоскую боковую поверхность | $1,26 r$ |
| Плоско-параллельный слой бесконечных размеров толщиной δ | $1,8 \delta$ |
| Пучок труб диаметром d , с расстоянием между поверхностями труб x и при расположении труб: | |
| а) по треугольнику $x = d$ | $2,8 x$ |
| б) по треугольнику $x = 2d$ | $3,8 x$ |
| в) по квадрату $x = d$ | $3,5 x$ |

Для средних значений фактора pl табл. 69 даёт значение l в зависимости от формы газового тела.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

- Антуфьев В. М., Казаченко Л. С. Теплоотдача и сопротивление конвективных поверхностей нагрева. М.—Л., ОНТИ, 1938, 252 с.
- Белоконов Н. И. Теплопередача при переменных температурах. В кн. «Труды Московского нефтяного института им. И. М. Губкина», Вып. 2, 1940 г. и сб. «Транспортное машиностроение» № 9 и 10, 1937 г.
- Белоконов Н. И. Развитие учения об основных принципах термодинамики. В кн. «Труды Московского нефтяного института им. И. М. Губкина», Вып. 5, М.—Л., 1947, с. 290—370.
- Брандт А. А. Основание термодинамики. М.—Л., 1926, 255 с.
- Бриджмен П. В. Физика высоких давлений. М.—Л., ОНТИ, 1935, 402 с.
- Быков Н. А. Термодинамика. М.—Л., 1928, 408 с.
- Вукалович М. П. Термодинамические свойства водяного пара. Госэнергоиздат, 1946, 88 с.
- Вукалович М. П. и Новиков И. И. «Доклады Академии наук СССР», 1939, № 8, 767—72.
- Вукалович М. П. и Новиков И. И. Теплоёмкости реальных газов. Изв. ОТН АН СССР № 6, 1939, с. 111—28.
- Герш С. Я. Глубокое охлаждение. 2-е изд. М., «Советская наука», 1947, 363 с.
- Гинзельгауд Ч. Н. Термодинамика. Перев. М.—Л., 1933, 174 с.
- Годнев И. и Свердлин А. О теплоёмкостях газов при высоких давлениях. «Химстрой», 1934, т. VI, № 1, с. 8—14.
- Гребер Г. и Эрк С. Основы учения о теплообмене. Перев. с нем., М.—Л., 1936.
- Гребер Г. Введение в теорию теплопередачи. 2-е изд., перев. с нем., М.—Л., Госэнергоиздат, 1933, 263 с.
- Гуггенгейм Э. А. Современная термодинамика, изложенная по методу У. Гиббса. Перев., М.—Л., 1941, 188 с.
- Гухман А. А. Физические основы теплопередачи. М.—Л., Энергоиздат, 1934, 315 с.
- Жуковский М. И. Истечение газа из резервуара конечного объёма. В кн. «Теплопередача и аэрогидродинамика», М., Машгиз, 1947, с. 3—28 (ЦКТИ, кн. 28).
- Жуковский В. С. Техническая термодинамика. М.—Л., 1940, 336 с.
- Журнал технической физики, т. II, Вып. 9—10, 1932.
- Журнал технической физики, т. VIII, вып. 13—14, 1938.
- Иноземцев Н. В. Течение и истечение газов и паров. Изд. МАИ, М., 1938.
- Кирпичёв М. В., Михеев Н. А., Эягенсон Л. С. Теплопередача. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940, 292 с.
- Кноблаух О. Таблицы и диаграммы для водяного пара, вычисленные на основе удель-

- ной теплоёмкости. М.—Л., Госэнергоиздат, 1943, 40 с.
24. Котельные установки под ред. Кирпичёва М.В., Ромма Э.И., Усенко Т.Т., т. I. М.—Л., Госэнергоиздат, 1941—46, 2 т.
25. Кузнецов Н. В. и Локшин В. А. Теплоотдача конвекцией в пучках труб, омывание поперечным потоком газов. «Тепло и сила», 1937, № 10, с. 19—26.
26. Кутателадзе С. С. Теплопередача при изменении агрегатного состояния. Л., Машгиз, 1939, 136 с.
27. Локшин В. А. Отчёты Всесоюзного теплотехнического института за 1939 г.
28. Мак-Адамс. Теплопередача. Перев. с англ., М.—Л., ОНТИ, 1936, 439 с.
29. Мачинский В. Д. Теплопередача в строительстве. М.—Л., Гостройиздат, 1939, 344 с.
30. Майер Р. Закон сохранения и превращения энергии. ГТТИ, М.—Л., 1933, 309 с.
31. Меншуткин Б. Н. Труды М. В. Ломоносова по физике и химии. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1936, 537 с.
32. Меркель Ф. Основы теплопередачи, Перев. с нем., М.—Л., ГИЗ, 1929, 344 с.
33. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М.—Л., Госэнергоиздат, 1947, 415 с.
34. Молодзеевский А. Б. Термодинамика, М., Учпедгиз, 1948, 184 с.
35. Нормы теплового расчёта котельных агрегатов, «Известия ВТИ» № 6, 1946, с. 22—29.
36. Орлин А. С. Двухтактные быстроходные двигатели. М., Машгиз, 1947, 184 с.
37. Пай В. Р. Двигатели внутреннего сгорания, Т. II, М., Оборонгиз, 1940, 260 с.
38. Поляк Т. Л. Теория лучистого теплообмена. ЭНИН АН СССР, 1938.
39. Правила № 169 по измерению расхода жидкостей, газов и пара. Главное управление мер и весов, Каталогиздат, М.—Л., 1938.
40. Раковский А. В. Введение в физическую химию, М., ГОНТИ, 1932, 677 с.
41. Сборник статей под ред. А. К. Тимирязева, Л.—М., ОНТИ, 1937, 220 с.
42. Сушков В. В. Техническая термодинамика. М.—Л., 1946, 312 с.
43. Тен-Бош, Теплопередача. Перев. с нем., М.—Л., Нефтяное изд-во. 1930, 495 с.
44. Тимрот Д. Л. Определение вязкости пара и воды при высоких температурах и давлениях. Изв. ВТИ, 1940, № 3, с. 16—23.
45. Хвольсон О. Д. Курс физики, т. III, ГИЗ, 1923.
46. «Хютте». Справочник, т. I, М.—Л., 1936.
47. Шап А. Теплопередача в промышленных установках. Перев. с нем. М.—Л., Энергоиздат, 1933, 380 с.
48. Шюле В. Техническая термодинамика. т. II, перев. с нем., М.—Л., 1938.
49. Энгельс Ф. Диалектика природы. М., Госполитиздат, 1948, 331 с.
50. Эйгенсон Л. С. Доклады АН СССР, т. XXVI, № 5, 1940.

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ



ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРИНЯТЫЕ В СССР

| Величина | Единица | Отношение к главной единице | Сокращённое обозначение | | Определение главных единиц |
|---------------------------------------|-------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------|---|
| | | | иностранным шрифтом | русским шрифтом | |
| I. Метрические меры (по ОСТ ВКС 5859) | | | | | |
| Масса | Килограмм | 1 | kg | кг | Килограмм есть единица массы, определяемая прототипом ¹ . Международным прототипом килограмма Первой генеральной конференции по мерам и весам в 1889 г. признана платино-иридиевая гиря, имеющая обозначение «К», которая хранится в Международном бюро мер и весов в Севре (Франция) Для СССР за основной эталон килограмма принята платино-иридиевая копия международного прототипа килограмма, имеющая обозначение «12» и хранящаяся во Всесоюзном институте метрологии в Ленинграде |
| | Тонна | 10 ³ | t | т | |
| | Центнер | 10 ² | q | ц | |
| | Грамм | 10 ⁻³ | g | г | |
| | Дециграмм | 10 ⁻⁴ | dg | дг | |
| | Миллиграмм | 10 ⁻⁶ | mg | мг | |
| Длина | Метр | 1 | m | м | Метр есть единица длины, определяемая прототипом. Международным прототипом метра Первой генеральной конференции по мерам и весам в 1889 г. признана нарезная платино-иридиевая мера, имеющая обозначение «М», которая хранится в Международном бюро мер и весов Для СССР за основной эталон метра принята платино-иридиевая копия международного прототипа метра, имеющая обозначение «28» и хранящаяся во Всесоюзном институте метрологии в Ленинграде |
| | Километр | 10 ³ | km | км | |
| | Дециметр | 10 ⁻¹ | dm | дм | |
| | Сантиметр | 10 ⁻² | cm | см | |
| | Миллиметр | 10 ⁻³ | mm | мм | |
| | Микрон | 10 ⁻⁶ | μ | мк | |
| | Миллимикрон | 10 ⁻⁹ | mμ | ммк | |
| | Ангстрем | 10 ⁻¹⁰ | °A | °A | |

¹ Прототипами называются международные и национальные эталоны метра и килограмма, изготовленные в Международном бюро мер и весов.

Продолжение

| Величина | Единица | Отношение к главной единице | Сокращённое обозначение | | Определение главных единиц |
|----------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---|
| | | | иностран- ным шрифтом | русским шрифтом | |
| Площадь (поверх- ность) | Квадратный метр | 1 | m ² | м ² (кв. м) | Квадратный метр есть площадь квадрата, сторона которого имеет длину, равную 1 м |
| | Гектар | 10 ⁴ | ha | га | |
| | Ар | 10 ³ | a | а | |
| | Квадратный дециметр | 10 ⁻² | dm ² | дм ² (кв. дм) | |
| Объём | Квадратный сантиметр | 10 ⁻⁴ | cm ² | см ² (кв. см) | Кубический метр есть объём куба, ребро которого имеет длину, равную 1 м |
| | Квадратный миллиметр | 10 ⁻⁶ | mm ² | мм ² (кв. мм) | |
| | Кубический метр | 1 | m ³ | м ³ (куб. м) | |
| | Кубический дециметр | 10 ⁻³ | dm ³ | дм ³ (куб. дм) | |
| | Кубический сантиметр | 10 ⁻⁶ | cm ³ | см ³ (куб. см) | |
| | Кубический миллиметр | 10 ⁻⁹ | mm ³ | мм ³ (куб. мм) | |
| Ёмкость (вместимость) | Литр | 1 | l | л | Литр есть объём 1 кг воды при наибольшей её плотности и при нормальном атмосферном давлении; 1 л = 1,000028 дм ³ |
| | Килолитр | 10 ³ | kl | кл | |
| | Гектолитр | 10 ² | hl | га | |
| | Декалитр | 10 | dkl | дкал | |
| | Децилитр | 10 ⁻¹ | dl | дал | |
| | Сантиметр | 10 ⁻² | cl | сда | |
| | Миллилитр | 10 ⁻³ | ml | мл | |

II. Механические единицы (по ОСТ ВКС 6052 и 6053)

А. Единицы системы CGS (сантиметр, грамм, секунда)

| | | | | | |
|------------------|------|---|----|-----|--|
| Сила | Дина | 1 | dp | дин | Сила, сообщаемая массе в 1 г ускорение в 1 см в секунду на секунду Работа, производимая силой в 1 дин при перемещении точки её приложения на 1 см по направлению этой силы Давление, которое испытывает плоская поверхность в 1 см ² под действием силы в 1 дин |
| Работа и энергия | Эрг | 1 | e | эрг | |
| Давление | Бар | 1 | b | б | |

Б. Единицы системы MKS (метр, килограмм-сила, секунда)

| | | | | | |
|------------------|--------------------------|------------------|-------------------|-------------------|--|
| Сила | Килограмм (сила) | 1 | kG | кг | Килограмм (сила) есть сила, сообщаемая массе в 1 кг ускорение 9,80665 м в секунду на секунду Работа, производимая силой в 1 кг при перемещении точки её приложения на 1 м по направлению этой силы Мощность, при которой в течение 1 сек. равномерно производится работа, равная 1 кгм |
| | Грамм (сила) | 10 ⁻³ | G | г | |
| Работа и энергия | Килограмм-метр | 1 | kGm | кгм | |
| Мощность | Килограмм-метр в секунду | 1 | $\frac{kGm}{sec}$ | $\frac{кгм}{сек}$ | |

Продолжение

| Величина | Единица | Отношение к главной единице | Сокращённое обозначение | | Определение главных единиц |
|--|--|--------------------------------|----------------------------|--------------------|---|
| | | | иностранным шрифтом | русским шрифтом | |
| Механическое напряжение (давление) | Килограмм на квадратный метр | 1 | kg | $\frac{кг}{м^2}$ | Килограмм на квадратный метр есть давление, которое испытывает плоская поверхность в 1 м ² под действием равномерно распределённой нагрузки в 1 кг |
| | | | m ² | | |
| | Килограмм на квадратный сантиметр (техническая атмосфера) | 10 ⁴ | kg | $\frac{кг}{см^2}$ | |
| | | | cm ² | | |

III. Международные электрические единицы (по ОСТ 515)

| | | | | | |
|---|---------------------------------------|--------------------|----|------|---|
| Электрическое сопротивление | Международный ом | 1 | Ω | ом | Международный ом есть сопротивление ртутного столба длиной в 106,300 см, имеющего сечение, одинаковое по всей длине, и массу в 144,521 г при температуре тающего льда |
| | Мегом | 10 ⁶ | MΩ | мгом | |
| | Микроом | 10 ⁻⁶ | μΩ | мком | |
| Сила тока | Международный ампер | 1 | A | а | Международный ампер есть сила неизменяющегося электрического тока, который отлагает 0,00111800 г серебра в 1 сек., проходя через водный раствор азотнокислого серебра |
| | Миллиампер | 10 ⁻³ | mA | ма | |
| | Микроампер | 10 ⁻⁶ | μA | мка | |
| Электрическое напряжение (электродвижущая сила) | Международный вольт | 1 | V | в | Международный вольт есть электрическое напряжение или электродвижущая сила, которые в проводнике, имеющем сопротивление в 1 ом, производят ток силой в 1 а |
| | Киловольт | 10 ³ | kV | кв | |
| | Милливольт | 10 ⁻³ | mV | мв | |
| | Микровольт | 10 ⁻⁶ | μV | мкв | |
| Электрическая мощность | Международный ватт | 1 | W | вт | Международный ватт есть мощность неизменяющегося электрического тока силой в 1 а при напряжении в 1 в |
| | Киловатт | 10 ³ | kW | квт | |
| | Гектоватт | 10 ² | hW | гвт | |
| Работа электрического тока | Международная ватт-секунда | 1 | Ws | вт-с | Международная ватт-секунда есть работа, совершаемая электрическим током в течение 1 сек. при мощности тока в 1 вт |
| | Ватт-час | 36·10 ² | Wh | вт-ч | |
| Количество электричества | Международный кулон или ампер-секунда | 1 | C | к | Кулон есть количество электричества, протекающее через поперечное сечение проводника в течение 1 сек. при токе в 1 а |
| Электрическая ёмкость | Международная фарада | 1 | F | Ф | Фарада есть ёмкость конденсатора, заряжаемого до напряжения в 1 в одним кулоном электричества |
| | Микрофарада | 10 ⁻⁶ | μF | — | |
| Индуктивность | Международный генри | 1 | H | гн | Генри есть индуктивность электрической цепи, в которой индуцируется электродвижущая сила в 1 в при равномерном изменении тока в этой цепи со скоростью 1 а в 1 сек. |
| | Миллигенри | 10 ⁻³ | mH | — | |

IV. Тепловые единицы $\left(\text{по } \frac{\text{ОСТ}}{\text{ВКС}} 6259 \right)$

| Величина | Единица | Сокращённые обозначения | | О п р е д е л е н и я |
|-------------|-------------------------------|-------------------------|------------------|--|
| | | латинскими буквами | русскими буквами | |
| Температура | Градус (международный) | °C | °C | <p>Одна сотая температурного промежутка между точками 0° и 100° международной температурной шкалы, устанавливаемой согласно положению о ней, принятому VII генеральной конференцией по мерам и весам в 1927 г. Единица энергии в абсолютной системе единиц МТС (ОСТ 6053), равная 10^{10} эргам</p> <p>Одна тысячная килоджоуля (10^7 эргов)</p> <p>Одна тысяча килоджоулей (10^{13} эргов)</p> <p>4,182 килоджоуля. Килокалория практически (с точностью до 0,02%) равна количеству теплоты, необходимому для нагревания массы воды в один килограмм от 19,5° до 20,5°С при нормальном атмосферном давлении (приложение)</p> <p>Одна тысячная калории (4,1821)</p> |
| Теплота | Килоджоуль | kJ | кжд | |
| | Джоуль | J | дж | |
| | Мегаджоуль | MJ | мгдж | |
| | Килокалория (большая калория) | kcal | ккал | |
| | Калория (малая калория) | cal | кал | |

1. По ОСТ 349 за нормальную температуру должна приниматься температура +20°С. Двадцатиградусная калория отвечает нагреву от 19,5 до 20,5°С.

2. Килокалория, установленная международной конференцией по таблицам пара в Лондоне в 1929 г., подтверждённая международной энергетической конференцией в Берлине в 1930 г. и условно называемая электрической, определяется как $\frac{1}{860}$ международного киловатт-часа. Она составляет 1,0013 килокалории, установленной ОСТ ВКС 6259.

Килокалория (19,5 — 20,5°С) = 4,182 kJ = $\frac{1}{861,1}$ kWh (международного).

Килокалория электрическая = 4,1875 kJ = $\frac{1}{860}$ kWh (международного).

3. По $\frac{\text{ОСТ}}{\text{ВКС}}$ 6954 международная температурная шкала, принятая VIII генеральной конференцией по мерам и весам в 1933 г., является практическим осуществлением термодинамической стоградусной температурной шкалы, у которой температура плавления льда и температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении обозначены соответственно через 0° и 100°.

Международная температурная шкала основывается на системе постоянных точно воспроизводимых температур равновесия (постоянных точек), которым присвоены числовые значения. Для определения промежуточных температур служат интерполяцион-

ные приборы, градуированные по этим постоянным точкам.

Основные постоянные точки международной температурной шкалы

а) — 182,97° — температура равновесия между жидким и газообразным кислородом при нормальном атмосферном давлении (точка кипения кислорода)

$$t_p = t_{760} + 0,0126 (p - 760) - 0,0000065 (p - 760)^2;$$

б) 0,000° — температура равновесия между льдом и насыщенным воздухом водой при нормальном атмосферном давлении (точка плавления льда);

в) 100,000° — температура равновесия между жидкой водой и её паром при нормальном атмосферном давлении (точка кипения воды)

$$t_p = t_{760} + 0,0367 (p - 760) - 0,000023 (p - 760)^2;$$

г) 444,60° — температура равновесия между жидкой серой и её паром при нормальном атмосферном давлении (точка кипения серы)

$$t_p = t_{760} + 0,0909 (p - 760) - 0,000048 (p - 760)^2;$$

д) 950,5° — температура равновесия между твёрдым и жидким серебром при нормальном атмосферном давлении (точка затвердевания серебра);

е) 1063,0° — температура равновесия между твёрдым и жидким золотом при нормальном атмосферном давлении (точка затвердевания золота).

Британская (англо-американская) система мер

Меры длины

1 миля (mile)=1 760 ярдам=5 280 футам
 1 ярд (yard)=3 футам=36 дюймам=360 линиям
 1 фут (foot)=12 дюймам (inch)

Иногда применяются:

1 цепь (chain)=22 ярдам
 1 фэсом (fathom)=2 ярдам=3 пядям (span)
 1 ладонь (hand)=4 дюймам=288 пунктам
 1 мил (mil)=0,001 дюйма

Меры поверхности

1 квадратная миля (640 акров) (acre)
 1 акр=10 кв. цепям=4 840 кв. ярдам=
 =43 560 кв. футам

Меры объема

1 кубический ярд=27 куб. футам
 1 кубический фут=1 728 куб. дюймам

Меры сыпучих тел

1 америк. бушель (U. S. bushel)=1,2445 куб. фута=2150,42 куб. дюйма
 1 бушель=4 пекам (peck)=32 квартам (quart)=64 пинтам (pint)
 1 англ. бушель (British Imperial bushel)=1,2837 куб. фута=2218,19 куб. дюйма

Меры жидкостей

1 бочка (tun)=2 пайпам (pipe) или буттам (butt)=4 баррелям (barrel)=126 галлонам (gallon)
 1 галлон=4 квартам=8 пинтам=32 джиллам (gill)

Меры веса (торговые)

1 большая или длинная тонна (gross or long ton)=2 240 фунтам
 1 малая и короткая тонна (net or short ton)=2 000 фунтам
 1 центнер (hundred—weight)= $\frac{1}{20}$ большой тонны=4 квартерам (quarter)=8 стонам (stone)=
 =112 фунтам
 1 фунт (pound)=16 унциям (ounce)=7 000 грамам (grain)
 1 унция=16 драхмам (drachm)=437,5 грама

Меры веса («тройские» и аптекарские)

1 тройский фунт (troy pound)=12 тройским унциям=240 весовым пенни (penny—weight)=
 =5 760 грамам
 1 аптекарский фунт=12 унциям=96 драхмам=288 скрупулам (scrupl)=5 760 грамам
 Вес грана торгового, тройского и аптекарского одинаков
 Вес фунта и унции тройских и аптекарских также одинаков

Единица давления

1 фунт на кв. дюйм=144 фунтам на кв. фут=0,068 атмосферы=2,042 дюйма ртутного столба (62° F*)=27,7 дюйма водяного столба (62° F)
 1 атмосфера=30 дюймам ртутного столба (62° F)=14,7 фунта на кв. дюйм
 1 дюйм ртутного столба (62° F)=13,58 дюйма водяного столба=0,491 фунта на кв. дюйм

* 62° F=16 $\frac{2}{3}$ °C.

ПЕРЕВОДНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Таблица 1. Дробные доли дюйма в десятичные доли дюйма

| | | | |
|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 1/2 . . . 0,5 | 3/32 . . . 0,09375 | 3/64 . . . 0,46875 | 35/64 . . . 0,546875 |
| 1/4 . . . 0,25 | 5/32 . . . 0,15625 | 5/64 . . . 0,78125 | 37/64 . . . 0,578125 |
| 3/4 . . . 0,75 | 7/32 . . . 0,21875 | 7/64 . . . 0,09375 | 39/64 . . . 0,609375 |
| 1/8 . . . 0,125 | 9/32 . . . 0,28125 | 9/64 . . . 0,40625 | 41/64 . . . 0,640625 |
| 3/8 . . . 0,375 | 11/32 . . . 0,34375 | 11/64 . . . 0,171875 | 43/64 . . . 0,671875 |
| 5/8 . . . 0,625 | 13/32 . . . 0,40625 | 13/64 . . . 0,203125 | 45/64 . . . 0,703125 |
| 7/8 . . . 0,875 | 15/32 . . . 0,46875 | 15/64 . . . 0,234375 | 47/64 . . . 0,734375 |
| 1/16 . . . 0,0625 | 17/32 . . . 0,53125 | 17/64 . . . 0,265625 | 49/64 . . . 0,765625 |
| 3/16 . . . 0,1875 | 19/32 . . . 0,59375 | 19/64 . . . 0,296875 | 51/64 . . . 0,796875 |
| 5/16 . . . 0,3125 | 21/32 . . . 0,65625 | 21/64 . . . 0,328125 | 53/64 . . . 0,828125 |
| 7/16 . . . 0,4375 | 23/32 . . . 0,71875 | 23/64 . . . 0,359375 | 55/64 . . . 0,859375 |
| 9/16 . . . 0,5625 | 25/32 . . . 0,78125 | 25/64 . . . 0,390625 | 57/64 . . . 0,890625 |
| 11/16 . . . 0,6875 | 27/32 . . . 0,84375 | 27/64 . . . 0,421875 | 59/64 . . . 0,921875 |
| 13/16 . . . 0,8125 | 29/32 . . . 0,90625 | 29/64 . . . 0,453125 | 61/64 . . . 0,953125 |
| 15/16 . . . 0,9375 | 31/32 . . . 0,96875 | 31/64 . . . 0,484375 | 63/64 . . . 0,984375 |
| 1/32 . . . 0,03125 | 1/64 . . . 0,015625 | 33/64 . . . 0,515625 | |

Таблица 2. Десятые доли дюйма и дюймы в миллиметры

| Дюймы | 0" | 0,1" | 0,2" | 0,3" | 0,4" | 0,5" | 0,6" | 0,7" | 0,8" | 0,9" |
|-------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | м и л л и м е т р ы | | | | | | | | | |
| 0" | — | 2,54 | 5,08 | 7,62 | 10,16 | 12,70 | 15,24 | 17,78 | 20,32 | 22,86 |
| 1" | 25,4 | 27,94 | 30,48 | 33,02 | 35,56 | 38,10 | 40,64 | 43,18 | 45,72 | 48,26 |
| 2" | 50,8 | 53,34 | 55,88 | 58,42 | 60,96 | 63,50 | 66,04 | 68,58 | 71,12 | 73,66 |
| 3" | 76,2 | 78,74 | 81,28 | 83,82 | 86,36 | 88,90 | 91,44 | 93,98 | 96,52 | 99,06 |
| 4" | 101,6 | 104,14 | 106,68 | 109,22 | 111,76 | 114,30 | 116,84 | 119,38 | 121,92 | 124,46 |
| 5" | 127,0 | 129,54 | 132,08 | 134,62 | 137,16 | 139,70 | 142,24 | 144,78 | 147,32 | 149,86 |
| 6" | 152,4 | 154,94 | 157,48 | 160,02 | 162,56 | 165,10 | 167,64 | 170,18 | 172,72 | 175,26 |
| 7" | 177,8 | 180,34 | 182,88 | 185,42 | 187,96 | 190,50 | 193,04 | 195,58 | 198,12 | 200,66 |
| 8" | 203,2 | 205,74 | 208,28 | 210,82 | 213,36 | 215,90 | 218,44 | 220,98 | 223,52 | 226,06 |
| 9" | 228,6 | 231,14 | 233,68 | 236,22 | 238,76 | 241,30 | 243,84 | 246,38 | 248,92 | 251,46 |

Таблица 3. Тысячные и сотые доли дюйма в миллиметры

| Дюймы | 0 | 0,001" | 0,002" | 0,003" | 0,004" | 0,005" | 0,006" | 0,007" | 0,008" | 0,009" |
|-------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | м и л л и м е т р ы | | | | | | | | | |
| 0,00" | — | 0,0254 | 0,0508 | 0,0762 | 0,1016 | 0,1270 | 0,1524 | 0,1778 | 0,2032 | 0,2286 |
| 0,01" | 0,2540 | 0,2794 | 0,3048 | 0,3302 | 0,3556 | 0,3810 | 0,4064 | 0,4318 | 0,4572 | 0,4826 |
| 0,02" | 0,5080 | 0,5334 | 0,5588 | 0,5842 | 0,6096 | 0,6350 | 0,6604 | 0,6858 | 0,7112 | 0,7366 |
| 0,03" | 0,7620 | 0,7874 | 0,8128 | 0,8382 | 0,8636 | 0,8890 | 0,9144 | 0,9398 | 0,9652 | 0,9906 |
| 0,04" | 1,0160 | 1,0414 | 1,0668 | 1,0922 | 1,1176 | 1,1430 | 1,1684 | 1,1938 | 1,2192 | 1,2446 |
| 0,05" | 1,2700 | 1,2954 | 1,3208 | 1,3462 | 1,3716 | 1,3970 | 1,4224 | 1,4478 | 1,4732 | 1,4986 |
| 0,06" | 1,5240 | 1,5494 | 1,5748 | 1,6002 | 1,6256 | 1,6510 | 1,6764 | 1,7018 | 1,7272 | 1,7526 |
| 0,07" | 1,7780 | 1,8034 | 1,8288 | 1,8542 | 1,8796 | 1,9050 | 1,9304 | 1,9558 | 1,9812 | 2,0066 |
| 0,08" | 2,0320 | 2,0574 | 2,0828 | 2,1082 | 2,1336 | 2,1590 | 2,1844 | 2,2098 | 2,2352 | 2,2606 |
| 0,09" | 2,2860 | 2,3114 | 2,3368 | 2,3622 | 2,3876 | 2,4130 | 2,4384 | 2,4638 | 2,4892 | 2,5146 |

Таблица 4. Футы и дюймы в миллиметры
1 фут=304,799 73 мм

| Фут | Дюйм | 0" | 1" | 2" | 3" | 4" | 5" | 6" | 7" | 8" | 9" | 10" | 11" | 12" |
|-----|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 0 | 0 | 25,4 | 51 | 76 | 102 | 127 | 152 | 178 | 203 | 229 | 254 | 279 | 305 |
| 1 | 12 | 305 | 330 | 356 | 381 | 406 | 432 | 457 | 483 | 508 | 533 | 559 | 584 | 610 |
| 2 | 24 | 610 | 635 | 660 | 686 | 711 | 737 | 762 | 787 | 813 | 838 | 864 | 889 | 914 |
| 3 | 36 | 914 | 940 | 965 | 991 | 1 016 | 1 041 | 1 067 | 1 092 | 1 118 | 1 143 | 1 168 | 1 194 | 1 219 |
| 4 | 48 | 1 219 | 1 245 | 1 270 | 1 295 | 1 321 | 1 346 | 1 372 | 1 397 | 1 422 | 1 448 | 1 473 | 1 499 | 1 524 |
| 5 | 60 | 1 524 | 1 549 | 1 575 | 1 600 | 1 626 | 1 651 | 1 676 | 1 702 | 1 727 | 1 753 | 1 778 | 1 803 | 1 829 |
| 6 | 72 | 1 829 | 1 854 | 1 880 | 1 905 | 1 930 | 1 956 | 1 981 | 2 007 | 2 032 | 2 057 | 2 083 | 2 108 | 2 134 |
| 7 | 84 | 2 134 | 2 159 | 2 184 | 2 210 | 2 235 | 2 261 | 2 286 | 2 311 | 2 337 | 2 362 | 2 388 | 2 413 | 2 438 |
| 8 | 96 | 2 438 | 2 464 | 2 489 | 2 515 | 2 540 | 2 565 | 2 591 | 2 616 | 2 642 | 2 667 | 2 692 | 2 718 | 2 743 |
| 9 | 108 | 2 743 | 2 769 | 2 794 | 2 819 | 2 845 | 2 870 | 2 896 | 2 921 | 2 946 | 2 972 | 2 997 | 3 023 | 3 048 |
| 10 | 120 | 3 048 | 3 073 | 3 099 | 3 124 | 3 150 | 3 175 | 3 200 | 3 226 | 3 251 | 3 277 | 3 302 | 3 327 | 3 353 |
| 11 | 132 | 3 353 | 3 378 | 3 404 | 3 429 | 3 454 | 3 480 | 3 505 | 3 531 | 3 556 | 3 581 | 3 607 | 3 632 | 3 658 |
| 12 | 144 | 3 658 | 3 683 | 3 708 | 3 734 | 3 759 | 3 785 | 3 810 | 3 835 | 3 861 | 3 886 | 3 912 | 3 937 | 3 962 |
| 13 | 156 | 3 962 | 3 988 | 4 013 | 4 039 | 4 064 | 4 089 | 4 115 | 4 140 | 4 166 | 4 191 | 4 216 | 4 242 | 4 267 |
| 14 | 168 | 4 267 | 4 293 | 4 318 | 4 343 | 4 369 | 4 394 | 4 420 | 4 445 | 4 470 | 4 496 | 4 521 | 4 547 | 4 572 |
| 15 | 180 | 4 572 | 4 597 | 4 623 | 4 648 | 4 674 | 4 699 | 4 724 | 4 750 | 4 775 | 4 801 | 4 826 | 4 851 | 4 877 |
| 16 | 192 | 4 877 | 4 902 | 4 928 | 4 953 | 4 978 | 5 004 | 5 029 | 5 055 | 5 080 | 5 106 | 5 131 | 5 156 | 5 182 |
| 17 | 204 | 5 182 | 5 207 | 5 232 | 5 258 | 5 283 | 5 309 | 5 334 | 5 359 | 5 385 | 5 410 | 5 436 | 5 461 | 5 486 |
| 18 | 216 | 5 486 | 5 512 | 5 537 | 5 563 | 5 588 | 5 613 | 5 639 | 5 664 | 5 690 | 5 715 | 5 740 | 5 766 | 5 791 |
| 19 | 228 | 5 791 | 5 817 | 5 842 | 5 867 | 5 893 | 5 918 | 5 944 | 5 969 | 5 994 | 6 020 | 6 045 | 6 071 | 6 096 |
| 20 | 240 | 6 096 | 6 121 | 6 147 | 6 172 | 6 198 | 6 223 | 6 248 | 6 274 | 6 299 | 6 325 | 6 350 | 6 375 | 6 401 |
| 21 | 252 | 6 401 | 6 426 | 6 452 | 6 477 | 6 502 | 6 528 | 6 553 | 6 579 | 6 604 | 6 629 | 6 655 | 6 680 | 6 706 |
| 22 | 264 | 6 706 | 6 731 | 6 756 | 6 782 | 6 807 | 6 833 | 6 858 | 6 883 | 6 909 | 6 934 | 6 960 | 6 985 | 7 010 |
| 23 | 276 | 7 010 | 7 036 | 7 061 | 7 087 | 7 112 | 7 137 | 7 163 | 7 188 | 7 214 | 7 239 | 7 264 | 7 290 | 7 315 |
| 24 | 288 | 7 315 | 7 341 | 7 366 | 7 391 | 7 417 | 7 442 | 7 467 | 7 493 | 7 518 | 7 543 | 7 569 | 7 594 | 7 620 |
| 25 | 300 | 7 620 | 7 645 | 7 671 | 7 696 | 7 722 | 7 747 | 7 772 | 7 798 | 7 823 | 7 849 | 7 874 | 7 899 | 7 925 |
| 26 | 312 | 7 925 | 7 950 | 7 975 | 8 001 | 8 026 | 8 052 | 8 077 | 8 102 | 8 128 | 8 153 | 8 179 | 8 204 | 8 230 |
| 27 | 324 | 8 230 | 8 255 | 8 280 | 8 306 | 8 332 | 8 357 | 8 382 | 8 408 | 8 433 | 8 458 | 8 484 | 8 509 | 8 534 |
| 28 | 336 | 8 534 | 8 559 | 8 585 | 8 610 | 8 636 | 8 661 | 8 686 | 8 712 | 8 737 | 8 763 | 8 788 | 8 814 | 8 839 |
| 29 | 348 | 8 839 | 8 864 | 8 890 | 8 915 | 8 941 | 8 966 | 8 991 | 9 017 | 9 042 | 9 068 | 9 093 | 9 118 | 9 144 |
| 30 | 360 | 9 144 | 9 169 | 9 195 | 9 220 | 9 246 | 9 271 | 9 296 | 9 322 | 9 347 | 9 373 | 9 398 | 9 423 | 9 449 |
| 31 | 372 | 9 449 | 9 474 | 9 500 | 9 525 | 9 551 | 9 576 | 9 601 | 9 627 | 9 652 | 9 677 | 9 703 | 9 728 | 9 753 |
| 32 | 384 | 9 754 | 9 779 | 9 804 | 9 830 | 9 855 | 9 881 | 9 906 | 9 931 | 9 957 | 9 982 | 10 008 | 10 033 | 10 058 |
| 33 | 396 | 10 058 | 10 083 | 10 109 | 10 134 | 10 160 | 10 185 | 10 210 | 10 236 | 10 261 | 10 287 | 10 312 | 10 337 | 10 363 |
| 34 | 408 | 10 363 | 10 388 | 10 414 | 10 439 | 10 465 | 10 490 | 10 515 | 10 541 | 10 566 | 10 592 | 10 617 | 10 642 | 10 668 |
| 35 | 420 | 10 668 | 10 693 | 10 719 | 10 744 | 10 770 | 10 795 | 10 820 | 10 846 | 10 871 | 10 897 | 10 922 | 10 947 | 10 973 |
| 36 | 432 | 10 973 | 10 998 | 11 024 | 11 049 | 11 075 | 11 100 | 11 125 | 11 151 | 11 176 | 11 202 | 11 227 | 11 252 | 11 278 |
| 37 | 444 | 11 278 | 11 303 | 11 328 | 11 354 | 11 379 | 11 405 | 11 430 | 11 455 | 11 481 | 11 506 | 11 532 | 11 557 | 11 582 |
| 38 | 456 | 11 582 | 11 607 | 11 633 | 11 658 | 11 684 | 11 709 | 11 734 | 11 760 | 11 785 | 11 811 | 11 836 | 11 861 | 11 887 |
| 39 | 468 | 11 887 | 11 912 | 11 938 | 11 963 | 11 989 | 12 014 | 12 039 | 12 065 | 12 090 | 12 116 | 12 141 | 12 166 | 12 192 |
| 40 | 480 | 12 192 | 12 217 | 12 243 | 12 268 | 12 294 | 12 319 | 12 344 | 12 370 | 12 395 | 12 421 | 12 446 | 12 471 | 12 497 |
| 41 | 492 | 12 497 | 12 522 | 12 548 | 12 573 | 12 598 | 12 624 | 12 649 | 12 675 | 12 700 | 12 725 | 12 751 | 12 776 | 12 802 |
| 42 | 504 | 12 802 | 12 827 | 12 852 | 12 878 | 12 903 | 12 929 | 12 954 | 12 979 | 13 005 | 13 030 | 13 056 | 13 081 | 13 106 |
| 43 | 516 | 13 106 | 13 132 | 13 157 | 13 183 | 13 208 | 13 233 | 13 259 | 13 284 | 13 310 | 13 335 | 13 360 | 13 386 | 13 411 |
| 44 | 528 | 13 411 | 13 437 | 13 462 | 13 487 | 13 513 | 13 538 | 13 564 | 13 589 | 13 614 | 13 640 | 13 665 | 13 691 | 13 716 |
| 45 | 540 | 13 716 | 13 741 | 13 767 | 13 792 | 13 818 | 13 843 | 13 868 | 13 894 | 13 919 | 13 945 | 13 970 | 13 995 | 14 021 |
| 46 | 552 | 14 021 | 14 046 | 14 072 | 14 097 | 14 122 | 14 148 | 14 173 | 14 199 | 14 224 | 14 249 | 14 275 | 14 300 | 14 326 |
| 47 | 564 | 14 326 | 14 351 | 14 376 | 14 402 | 14 427 | 14 453 | 14 478 | 14 503 | 14 529 | 14 554 | 14 580 | 14 605 | 14 630 |
| 48 | 576 | 14 630 | 14 656 | 14 681 | 14 707 | 14 732 | 14 757 | 14 783 | 14 808 | 14 834 | 14 859 | 14 884 | 14 910 | 14 935 |
| 49 | 588 | 14 935 | 14 961 | 14 986 | 15 011 | 15 037 | 15 062 | 15 088 | 15 113 | 15 138 | 15 164 | 15 189 | 15 215 | 15 240 |
| 50 | 600 | 15 240 | 15 265 | 15 291 | 15 316 | 15 342 | 15 367 | 15 392 | 15 418 | 15 443 | 15 469 | 15 494 | 15 519 | 15 545 |
| 51 | 612 | 15 545 | 15 570 | 15 596 | 15 621 | 15 646 | 15 672 | 15 697 | 15 723 | 15 748 | 15 773 | 15 799 | 15 824 | 15 850 |
| 52 | 624 | 15 850 | 15 875 | 15 900 | 15 926 | 15 951 | 15 977 | 16 002 | 16 027 | 16 053 | 16 078 | 16 104 | 16 129 | 16 154 |
| 53 | 636 | 16 154 | 16 180 | 16 205 | 16 231 | 16 256 | 16 281 | 16 307 | 16 332 | 16 358 | 16 383 | 16 408 | 16 434 | 16 459 |
| 54 | 648 | 16 459 | 16 485 | 16 510 | 16 535 | 16 561 | 16 586 | 16 612 | 16 637 | 16 662 | 16 688 | 16 713 | 16 739 | 16 764 |

Таблица 5. $\frac{1}{16}$ доли дюйма и

| Дюймы | 0 | $\frac{1}{16}$ | $\frac{1}{8}$ | $\frac{3}{16}$ | $\frac{1}{4}$ | $\frac{5}{16}$ | $\frac{3}{8}$ | $\frac{7}{16}$ |
|-------|----------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| 0 | 0,000 | 1,588 | 3,175 | 4,763 | 6,350 | 7,938 | 9,525 | 11,113 |
| 1 | 25,400 | 26,988 | 28,575 | 30,163 | 31,750 | 33,338 | 34,925 | 36,513 |
| 2 | 50,800 | 52,388 | 53,975 | 55,563 | 57,150 | 58,738 | 60,325 | 61,913 |
| 3 | 76,200 | 77,788 | 79,375 | 80,963 | 82,550 | 84,138 | 85,725 | 87,313 |
| 4 | 101,600 | 103,188 | 104,775 | 106,363 | 107,950 | 109,538 | 111,125 | 112,713 |
| 5 | 127,000 | 128,588 | 130,175 | 131,763 | 133,350 | 134,938 | 136,525 | 138,113 |
| 6 | 152,400 | 153,988 | 155,575 | 157,163 | 158,750 | 160,338 | 161,925 | 163,513 |
| 7 | 177,800 | 179,388 | 180,975 | 182,563 | 184,150 | 185,738 | 187,325 | 188,913 |
| 8 | 203,200 | 204,788 | 206,375 | 207,963 | 209,550 | 211,138 | 212,725 | 214,313 |
| 9 | 228,600 | 230,188 | 231,775 | 233,363 | 234,950 | 236,538 | 238,125 | 239,713 |
| 10 | 254,400 | 255,988 | 257,575 | 258,763 | 260,350 | 261,938 | 263,525 | 265,113 |
| 11 | 279,400 | 280,988 | 282,575 | 284,163 | 285,750 | 287,338 | 288,925 | 290,513 |
| 12 | 304,800 | 306,388 | 307,975 | 309,563 | 311,150 | 312,738 | 314,325 | 315,913 |
| 13 | 330,200 | 331,788 | 333,375 | 334,963 | 336,550 | 338,138 | 339,725 | 341,313 |
| 14 | 355,600 | 357,188 | 358,775 | 360,363 | 361,950 | 363,538 | 365,125 | 366,713 |
| 15 | 381,000 | 382,588 | 384,175 | 385,763 | 387,350 | 388,938 | 390,525 | 392,113 |
| 16 | 406,400 | 407,988 | 409,575 | 411,163 | 413,750 | 414,338 | 415,925 | 417,513 |
| 17 | 431,800 | 433,388 | 434,975 | 436,563 | 438,150 | 439,738 | 441,325 | 442,913 |
| 18 | 457,200 | 458,788 | 460,375 | 461,963 | 463,550 | 465,138 | 466,725 | 468,313 |
| 19 | 482,600 | 484,188 | 485,775 | 487,363 | 488,950 | 490,538 | 492,125 | 493,713 |
| 20 | 508,000 | 509,588 | 511,175 | 512,763 | 514,350 | 515,938 | 517,525 | 519,113 |
| 21 | 533,400 | 534,988 | 536,575 | 538,163 | 539,750 | 541,338 | 542,925 | 544,513 |
| 22 | 558,800 | 560,388 | 561,975 | 563,563 | 565,150 | 566,738 | 568,325 | 569,913 |
| 23 | 584,200 | 585,788 | 587,375 | 588,963 | 590,550 | 592,138 | 593,725 | 595,313 |
| 24 | 609,600 | 611,188 | 612,775 | 614,363 | 615,950 | 617,538 | 619,125 | 620,713 |
| 25 | 635,000 | 636,588 | 638,175 | 639,763 | 641,350 | 642,938 | 644,525 | 646,113 |
| 26 | 660,400 | 661,988 | 663,575 | 665,163 | 666,750 | 668,338 | 669,925 | 671,513 |
| 27 | 685,800 | 687,388 | 688,975 | 690,563 | 692,150 | 693,738 | 695,325 | 696,913 |
| 28 | 711,200 | 712,788 | 714,375 | 715,963 | 717,550 | 719,138 | 720,725 | 722,313 |
| 29 | 736,600 | 738,188 | 739,775 | 741,363 | 742,950 | 744,538 | 746,125 | 747,713 |
| 30 | 762,000 | 763,588 | 765,175 | 766,763 | 768,350 | 769,938 | 771,525 | 773,113 |
| 31 | 787,400 | 788,988 | 790,575 | 792,163 | 793,750 | 795,338 | 796,925 | 798,513 |
| 32 | 812,800 | 814,388 | 815,975 | 817,563 | 819,150 | 820,738 | 822,325 | 823,913 |
| 33 | 838,200 | 839,788 | 841,375 | 842,963 | 844,550 | 846,138 | 847,725 | 849,313 |
| 34 | 863,600 | 865,188 | 866,775 | 868,363 | 869,950 | 871,538 | 873,125 | 874,713 |
| 35 | 889,000 | 890,588 | 892,175 | 893,763 | 895,350 | 896,938 | 898,525 | 900,113 |
| 36 | 914,400 | 915,988 | 917,575 | 919,163 | 920,750 | 922,338 | 923,925 | 925,513 |
| 37 | 939,800 | 941,388 | 942,975 | 944,563 | 946,150 | 947,738 | 949,325 | 950,913 |
| 38 | 965,200 | 966,788 | 968,375 | 969,963 | 971,550 | 973,138 | 974,725 | 976,313 |
| 39 | 990,600 | 992,188 | 993,775 | 995,363 | 996,950 | 998,538 | 1 000,125 | 1 001,71 |
| 40 | 1 016,00 | 1 017,59 | 1 019,18 | 1 020,76 | 1 022,35 | 1 023,94 | 1 025,53 | 1 027,11 |
| 41 | 1 041,40 | 1 042,99 | 1 044,58 | 1 046,16 | 1 047,75 | 1 049,34 | 1 050,93 | 1 052,51 |
| 42 | 1 066,80 | 1 068,39 | 1 069,98 | 1 071,56 | 1 073,15 | 1 074,74 | 1 076,33 | 1 077,91 |
| 43 | 1 092,20 | 1 093,79 | 1 095,38 | 1 096,96 | 1 098,55 | 1 100,14 | 1 101,73 | 1 103,31 |
| 44 | 1 117,60 | 1 119,19 | 1 120,78 | 1 122,36 | 1 123,95 | 1 125,54 | 1 127,13 | 1 128,71 |
| 45 | 1 143,00 | 1 144,59 | 1 146,18 | 1 147,76 | 1 149,35 | 1 150,94 | 1 152,53 | 1 154,11 |
| 46 | 1 168,40 | 1 169,99 | 1 171,58 | 1 173,16 | 1 174,75 | 1 176,34 | 1 177,93 | 1 179,51 |
| 47 | 1 193,80 | 1 195,39 | 1 196,98 | 1 198,56 | 1 200,15 | 1 201,74 | 1 203,33 | 1 204,91 |
| 48 | 1 219,20 | 1 220,79 | 1 222,38 | 1 223,96 | 1 225,55 | 1 227,14 | 1 228,73 | 1 230,31 |
| 49 | 1 244,60 | 1 246,19 | 1 247,78 | 1 249,36 | 1 250,95 | 1 252,54 | 1 254,13 | 1 255,71 |
| 50 | 1 270,00 | 1 271,59 | 1 273,18 | 1 274,76 | 1 276,33 | 1 277,94 | 1 279,33 | 1 281,11 |
| 51 | 1 295,4 | 1 297,0 | 1 298,6 | 1 300,2 | 1 301,7 | 1 303,3 | 1 304,9 | 1 306,5 |
| 52 | 1 320,8 | 1 322,4 | 1 324,0 | 1 325,6 | 1 327,1 | 1 328,7 | 1 330,3 | 1 331,9 |
| 53 | 1 346,2 | 1 347,8 | 1 349,4 | 1 351,0 | 1 352,5 | 1 354,1 | 1 355,7 | 1 357,3 |
| 54 | 1 371,6 | 1 373,2 | 1 374,8 | 1 376,4 | 1 377,9 | 1 379,5 | 1 381,1 | 1 382,7 |
| 55 | 1 397,0 | 1 398,6 | 1 400,2 | 1 401,8 | 1 403,3 | 1 404,9 | 1 406,5 | 1 408,1 |
| 56 | 1 422,4 | 1 424,0 | 1 425,6 | 1 427,2 | 1 428,7 | 1 430,3 | 1 431,9 | 1 433,5 |
| 57 | 1 447,8 | 1 449,4 | 1 451,0 | 1 452,6 | 1 454,1 | 1 455,7 | 1 457,3 | 1 458,9 |
| 58 | 1 473,2 | 1 474,8 | 1 476,4 | 1 478,0 | 1 479,5 | 1 481,1 | 1 482,7 | 1 484,3 |
| 59 | 1 498,6 | 1 500,2 | 1 501,8 | 1 503,4 | 1 504,9 | 1 506,5 | 1 508,1 | 1 509,7 |
| 60 | 1 524,0 | 1 525,6 | 1 527,2 | 1 528,8 | 1 530,3 | 1 531,9 | 1 533,5 | 1 535,1 |

ДЮЙМЫ В МИЛЛИМЕТРЫ

| $\frac{1}{2}$ | $\frac{9}{16}$ | $\frac{5}{8}$ | $\frac{11}{16}$ | $\frac{3}{4}$ | $\frac{13}{16}$ | $\frac{7}{8}$ | $\frac{15}{16}$ | Дюймы |
|---------------|----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-------|
| 12,700 | 14,288 | 15,875 | 17,463 | 19,050 | 20,638 | 22,225 | 23,813 | 0 |
| 38,100 | 39,688 | 41,275 | 42,863 | 44,450 | 46,038 | 47,625 | 49,213 | 1 |
| 63,500 | 65,088 | 66,675 | 68,263 | 69,850 | 71,438 | 73,025 | 74,613 | 2 |
| 88,900 | 90,488 | 92,075 | 93,663 | 95,250 | 96,838 | 98,425 | 100,013 | 3 |
| 114,300 | 115,888 | 117,475 | 119,063 | 120,650 | 122,238 | 123,825 | 125,413 | 4 |
| 139,700 | 141,288 | 142,875 | 144,463 | 146,050 | 147,638 | 149,225 | 150,813 | 5 |
| 165,100 | 166,688 | 168,275 | 169,863 | 171,450 | 173,038 | 174,625 | 176,213 | 6 |
| 190,500 | 192,088 | 193,675 | 195,263 | 196,850 | 198,438 | 200,025 | 201,613 | 7 |
| 215,900 | 217,488 | 219,075 | 220,663 | 222,250 | 223,838 | 225,425 | 227,013 | 8 |
| 241,300 | 242,888 | 244,475 | 246,063 | 247,650 | 249,238 | 250,825 | 252,413 | 9 |
| 266,700 | 268,288 | 269,875 | 271,463 | 273,050 | 274,638 | 276,225 | 277,813 | 10 |
| 292,100 | 293,688 | 295,275 | 296,863 | 298,450 | 300,038 | 301,625 | 303,213 | 11 |
| 317,500 | 319,088 | 320,675 | 322,263 | 323,850 | 325,438 | 327,025 | 328,613 | 12 |
| 342,900 | 344,488 | 346,075 | 347,663 | 349,250 | 350,838 | 352,425 | 354,013 | 13 |
| 368,300 | 369,888 | 371,475 | 373,063 | 374,650 | 376,238 | 377,825 | 379,413 | 14 |
| 393,700 | 395,288 | 396,875 | 398,463 | 400,050 | 401,638 | 403,225 | 404,813 | 15 |
| 419,100 | 420,688 | 422,275 | 423,863 | 425,450 | 427,038 | 428,625 | 430,213 | 16 |
| 444,500 | 446,088 | 447,675 | 449,263 | 450,850 | 452,438 | 454,025 | 455,613 | 17 |
| 469,900 | 471,488 | 473,075 | 474,663 | 476,250 | 477,838 | 479,425 | 481,013 | 18 |
| 495,300 | 496,888 | 498,475 | 500,063 | 501,650 | 503,238 | 504,825 | 506,413 | 19 |
| 520,700 | 522,288 | 523,875 | 525,463 | 527,050 | 528,638 | 530,225 | 531,813 | 20 |
| 546,100 | 547,688 | 549,275 | 550,863 | 552,450 | 554,038 | 555,625 | 557,213 | 21 |
| 571,500 | 573,088 | 574,675 | 576,263 | 577,850 | 579,438 | 581,025 | 582,613 | 22 |
| 596,900 | 598,488 | 600,075 | 601,663 | 603,250 | 604,838 | 606,425 | 608,013 | 23 |
| 622,300 | 623,888 | 625,475 | 627,063 | 628,650 | 630,238 | 631,825 | 633,413 | 24 |
| 647,700 | 649,288 | 650,875 | 652,463 | 654,050 | 655,638 | 657,225 | 658,813 | 25 |
| 673,100 | 674,688 | 676,275 | 677,863 | 679,450 | 681,038 | 682,625 | 684,213 | 26 |
| 698,500 | 700,088 | 701,675 | 703,263 | 704,850 | 706,438 | 708,025 | 709,613 | 27 |
| 723,900 | 725,488 | 727,075 | 728,663 | 730,250 | 731,838 | 733,425 | 735,013 | 28 |
| 749,300 | 750,888 | 752,475 | 754,063 | 755,650 | 757,238 | 758,825 | 760,413 | 29 |
| 774,700 | 776,288 | 777,875 | 779,463 | 781,050 | 782,638 | 784,225 | 785,813 | 30 |
| 800,100 | 801,688 | 803,275 | 804,863 | 806,450 | 808,038 | 809,625 | 811,213 | 31 |
| 825,500 | 827,088 | 828,675 | 830,263 | 831,850 | 833,438 | 835,025 | 836,613 | 32 |
| 850,900 | 852,488 | 854,075 | 855,663 | 857,250 | 858,838 | 860,425 | 862,013 | 33 |
| 876,300 | 877,888 | 879,475 | 881,063 | 882,650 | 884,238 | 885,825 | 887,413 | 34 |
| 901,700 | 903,288 | 904,875 | 906,463 | 908,050 | 909,638 | 911,225 | 912,813 | 35 |
| 927,100 | 928,688 | 930,275 | 931,863 | 933,450 | 935,038 | 936,625 | 938,213 | 36 |
| 952,500 | 954,088 | 955,675 | 957,263 | 958,850 | 960,438 | 962,025 | 963,613 | 37 |
| 977,900 | 979,488 | 981,075 | 982,663 | 984,250 | 985,838 | 987,425 | 989,013 | 38 |
| 1 003,300 | 1 004,89 | 1 006,48 | 1 008,06 | 1 009,65 | 1 011,24 | 1 012,825 | 1 014,41 | 39 |
| 1 028,70 | 1 030,29 | 1 031,88 | 1 033,46 | 1 035,05 | 1 036,64 | 1 038,23 | 1 039,81 | 40 |
| 1 054,10 | 1 055,69 | 1 057,28 | 1 058,86 | 1 060,45 | 1 062,04 | 1 063,63 | 1 065,21 | 41 |
| 1 079,50 | 1 081,09 | 1 082,68 | 1 084,26 | 1 085,85 | 1 087,44 | 1 089,03 | 1 090,61 | 42 |
| 1 104,90 | 1 106,49 | 1 108,08 | 1 109,66 | 1 111,25 | 1 112,84 | 1 114,43 | 1 116,01 | 43 |
| 1 130,30 | 1 131,89 | 1 133,48 | 1 135,06 | 1 136,65 | 1 138,24 | 1 139,83 | 1 141,41 | 44 |
| 1 155,70 | 1 157,29 | 1 158,88 | 1 160,46 | 1 162,05 | 1 163,64 | 1 165,23 | 1 166,81 | 45 |
| 1 181,10 | 1 182,69 | 1 184,28 | 1 185,86 | 1 187,45 | 1 189,04 | 1 190,63 | 1 192,21 | 46 |
| 1 206,50 | 1 208,09 | 1 209,68 | 1 211,26 | 1 212,85 | 1 214,44 | 1 216,03 | 1 217,61 | 47 |
| 1 231,90 | 1 233,49 | 1 235,08 | 1 236,66 | 1 238,25 | 1 239,84 | 1 241,43 | 1 243,01 | 48 |
| 1 257,30 | 1 258,89 | 1 260,48 | 1 262,06 | 1 263,65 | 1 265,24 | 1 266,83 | 1 268,41 | 49 |
| 1 282,70 | 1 284,29 | 1 285,88 | 1 287,46 | 1 289,05 | 1 290,64 | 1 292,23 | 1 293,81 | 50 |
| 1 308,1 | 1 309,7 | 1 311,3 | 1 312,9 | 1 314,4 | 1 316,0 | 1 317,6 | 1 319,2 | 51 |
| 1 333,5 | 1 335,1 | 1 336,7 | 1 338,3 | 1 339,8 | 1 341,4 | 1 343,0 | 1 344,6 | 52 |
| 1 358,9 | 1 360,5 | 1 362,1 | 1 363,7 | 1 365,2 | 1 366,8 | 1 368,4 | 1 370,0 | 53 |
| 1 384,3 | 1 385,9 | 1 387,5 | 1 389,1 | 1 390,6 | 1 392,2 | 1 393,8 | 1 395,4 | 54 |
| 1 409,7 | 1 411,3 | 1 412,9 | 1 414,5 | 1 416,0 | 1 417,6 | 1 419,2 | 1 420,8 | 55 |
| 1 435,1 | 1 436,7 | 1 438,3 | 1 439,9 | 1 441,4 | 1 443,0 | 1 444,6 | 1 446,2 | 56 |
| 1 460,5 | 1 462,1 | 1 463,7 | 1 465,3 | 1 466,8 | 1 468,4 | 1 470,0 | 1 471,6 | 57 |
| 1 485,9 | 1 487,5 | 1 489,1 | 1 490,7 | 1 492,2 | 1 493,8 | 1 495,4 | 1 497,0 | 58 |
| 1 511,3 | 1 512,9 | 1 514,5 | 1 516,1 | 1 517,6 | 1 519,2 | 1 520,8 | 1 522,4 | 59 |
| 1 536,7 | 1 538,3 | 1 539,9 | 1 541,5 | 1 543,0 | 1 544,6 | 1 546,2 | 1 547,8 | 60 |

Таблица 6. Английские фунты lbs в килограммы

| Англ. фунты | Килограммы | Центнеры англ. свт. | Центнеры амер. свт. | Англ. фунты | Килограммы | Центнеры англ. свт. | Центнеры амер. свт. | Англ. фунты | Килограммы | Центнеры англ. свт. | Центнеры амер. свт. | Англ. фунты | Килограммы | Центнеры англ. свт. | Центнеры амер. свт. |
|-------------|------------|---------------------|---------------------|-------------|------------|---------------------|---------------------|-------------|------------|---------------------|---------------------|-------------|------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 0,453 | 0,008928 | 0,01 | 26 | 11,78 | 0,2321 | 0,26 | 51 | 23,10 | 0,4553 | 0,51 | 76 | 34,43 | 0,6784 | 0,76 |
| 2 | 0,906 | 0,017856 | 0,02 | 27 | 12,23 | 0,2411 | 0,27 | 52 | 23,55 | 0,4642 | 0,52 | 77 | 34,88 | 0,6875 | 0,77 |
| 3 | 1,359 | 0,026784 | 0,03 | 28 | 12,69 | 0,2500 | 0,28 | 53 | 24,01 | 0,4732 | 0,53 | 78 | 35,34 | 0,6964 | 0,78 |
| 4 | 1,812 | 0,035712 | 0,04 | 29 | 13,14 | 0,2589 | 0,29 | 54 | 24,46 | 0,4821 | 0,54 | 79 | 35,79 | 0,7053 | 0,79 |
| 5 | 2,265 | 0,044640 | 0,05 | 30 | 13,59 | 0,2678 | 0,30 | 55 | 24,91 | 0,4910 | 0,55 | 80 | 36,28 | 0,7142 | 0,80 |
| 6 | 2,718 | 0,053568 | 0,06 | 31 | 14,04 | 0,2767 | 0,31 | 56 | 25,37 | 0,4999 | 0,56 | 81 | 36,69 | 0,7231 | 0,81 |
| 7 | 3,171 | 0,062496 | 0,07 | 32 | 14,50 | 0,2856 | 0,32 | 57 | 25,82 | 0,5089 | 0,57 | 82 | 37,15 | 0,7320 | 0,82 |
| 8 | 3,624 | 0,071424 | 0,08 | 33 | 14,95 | 0,2946 | 0,33 | 58 | 26,28 | 0,5178 | 0,58 | 83 | 37,60 | 0,7410 | 0,83 |
| 9 | 4,077 | 0,080352 | 0,09 | 34 | 15,40 | 0,3035 | 0,34 | 59 | 26,73 | 0,5267 | 0,59 | 84 | 38,05 | 0,7499 | 0,84 |
| 10 | 4,530 | 0,0893 | 0,10 | 35 | 15,85 | 0,3124 | 0,35 | 60 | 27,18 | 0,5356 | 0,60 | 85 | 38,50 | 0,7588 | 0,85 |
| 11 | 4,989 | 0,0982 | 0,11 | 36 | 16,31 | 0,3213 | 0,36 | 61 | 27,63 | 0,5445 | 0,61 | 86 | 38,96 | 0,7678 | 0,86 |
| 12 | 5,442 | 0,1071 | 0,12 | 37 | 16,76 | 0,3302 | 0,37 | 62 | 28,09 | 0,5535 | 0,62 | 87 | 39,41 | 0,7767 | 0,87 |
| 13 | 5,895 | 0,1161 | 0,13 | 38 | 17,21 | 0,3392 | 0,38 | 63 | 28,53 | 0,5624 | 0,63 | 88 | 39,86 | 0,7856 | 0,88 |
| 14 | 6,348 | 0,1250 | 0,14 | 39 | 17,67 | 0,3481 | 0,39 | 64 | 28,99 | 0,5713 | 0,64 | 89 | 40,32 | 0,7946 | 0,89 |
| 15 | 6,801 | 0,1339 | 0,15 | 40 | 18,14 | 0,3571 | 0,40 | 65 | 29,45 | 0,5802 | 0,65 | 90 | 40,77 | 0,8035 | 0,90 |
| 16 | 7,254 | 0,1428 | 0,16 | 41 | 18,57 | 0,3660 | 0,41 | 66 | 29,90 | 0,5892 | 0,66 | 91 | 41,22 | 0,8124 | 0,91 |
| 17 | 7,707 | 0,1518 | 0,17 | 42 | 19,03 | 0,3749 | 0,42 | 67 | 30,35 | 0,5981 | 0,67 | 92 | 41,68 | 0,8213 | 0,92 |
| 18 | 8,160 | 0,1607 | 0,18 | 43 | 19,48 | 0,3839 | 0,43 | 68 | 30,81 | 0,6071 | 0,68 | 93 | 42,13 | 0,8303 | 0,93 |
| 19 | 8,613 | 0,1696 | 0,19 | 44 | 19,93 | 0,3928 | 0,44 | 69 | 31,26 | 0,6159 | 0,69 | 94 | 42,45 | 0,8392 | 0,94 |
| 20 | 9,066 | 0,1786 | 0,20 | 45 | 20,38 | 0,4017 | 0,45 | 70 | 31,71 | 0,6249 | 0,70 | 95 | 43,03 | 0,8481 | 0,95 |
| 21 | 9,519 | 0,1875 | 0,21 | 46 | 20,83 | 0,4106 | 0,46 | 71 | 32,17 | 0,6338 | 0,71 | 96 | 43,49 | 0,8570 | 0,96 |
| 22 | 9,972 | 0,1964 | 0,22 | 47 | 21,28 | 0,4196 | 0,47 | 72 | 32,62 | 0,6428 | 0,72 | 97 | 43,94 | 0,8660 | 0,97 |
| 23 | 10,425 | 0,2054 | 0,23 | 48 | 21,74 | 0,4285 | 0,48 | 73 | 33,07 | 0,6516 | 0,73 | 98 | 44,39 | 0,8749 | 0,98 |
| 24 | 10,878 | 0,2143 | 0,24 | 49 | 22,20 | 0,4374 | 0,49 | 74 | 33,52 | 0,6606 | 0,74 | 99 | 44,85 | 0,8839 | 0,99 |
| 25 | 11,340 | 0,2232 | 0,25 | 50 | 22,68 | 0,4464 | 0,50 | 75 | 33,98 | 0,6696 | 0,75 | 100 | 45,36 | 0,8928 | 1,00 |

Таблица 7. Фунты на кв. дюйм («psi») в килограммы на кв. сантиметр

| Фунты на кв. дюйм | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | килограммы на кв. сантиметр | | | | | | | | | |
| 0 | — | 0,0703 | 0,1406 | 0,2109 | 0,2812 | 0,3515 | 0,4218 | 0,4921 | 0,5625 | 0,6328 |
| 10 | 0,7031 | 0,7734 | 0,8437 | 0,9140 | 0,9843 | 1,0546 | 1,1249 | 1,1952 | 1,2655 | 1,3358 |
| 20 | 1,4062 | 1,4765 | 1,5468 | 1,6171 | 1,6874 | 1,7577 | 1,8280 | 1,8983 | 1,9686 | 2,0389 |
| 30 | 2,1092 | 2,1795 | 2,2498 | 2,3202 | 2,3905 | 2,4608 | 2,5311 | 2,6014 | 2,6717 | 2,7420 |
| 40 | 2,8123 | 2,8826 | 2,9529 | 3,0232 | 3,0935 | 3,1639 | 3,2342 | 3,3045 | 3,3748 | 3,4451 |
| 50 | 3,5154 | 3,5857 | 3,6560 | 3,7263 | 3,7966 | 3,8669 | 3,9372 | 4,0075 | 4,0779 | 4,1482 |
| 60 | 4,2185 | 4,2888 | 4,3591 | 4,4294 | 4,4997 | 4,5700 | 4,6403 | 4,7106 | 4,7809 | 4,8512 |
| 70 | 4,9216 | 4,9919 | 5,0622 | 5,1325 | 5,2028 | 5,2731 | 5,3434 | 5,4137 | 5,4840 | 5,5543 |
| 80 | 5,6246 | 5,6949 | 5,7652 | 5,8356 | 5,9059 | 5,9762 | 6,0465 | 6,1168 | 6,1871 | 6,2574 |
| 90 | 6,3277 | 6,3980 | 6,4683 | 6,5386 | 6,6089 | 6,6793 | 6,7496 | 6,8199 | 6,8902 | 6,9605 |
| 100 | 7,0308 | 7,1011 | 7,1714 | 7,2417 | 7,3120 | 7,3823 | 7,4526 | 7,5229 | 7,5933 | 7,6636 |

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ



При пользовании настоящим указателем следует иметь в виду, что каждое название упоминается, как правило, один раз и не повторяется в перестановке слов.

В указателе упоминается сперва основное слово (за редкими исключениями), а потом его определение, например: «Газы идеальные» и т. п.

В большинстве случаев, когда формула, определение, уравнение, способ, метод и пр. носят название того или другого учёного, то в указателе приводится лишь фамилия учёного (без сопровождающего термина), например: Чебышев П. Л., а не «Чебышева П. Л. уравнение» и не «Уравнение Чебышева П. Л.».

А

Абсорбция 346
Авогадро 531, 544
Автокоалесценция 354
Адамс 258
Адьюнкта 101
Адсорбция 345, 346
Азот 282
Аккумулятор 494
— свинцовый 494
— щелочный 495
Активность 338
Актиний 279
Алгебра 91
— векторная 207
Алкадиены 297
Алканы 295
Алкены 297
Алкины 298
Алкоголь 300
Алмаз 279
Альдегиды 302
Алюминий 278
Амальгама 278
Амиды кислот 304
Амины 305
Аммиак 282
Аммонал 306
Аммоний 282
Аммофосы 283
Ампер-час 495
Амплитуда 497
Анализ гармонический 256
Ангидрид угольный 279
Ангидрит 277
Анилин — паросульфокислоты 306
Анион 274, 319, 494
Анод 494
Антуфьев В. М. 587
Аньези 199

Аргон 274
Аргумент комплексного числа 100
— в градусах 79
— в дуговых единицах 79
Арифметика 91
Арсенаты 283
Арсениты 283
Арсин 283
Архимед 411
Асимптота 185, 196
Ассоциативность 91
Атмосфера стандартная 475
Афанасьева Т. 529
Ацетилен 298
Ацетон 303
Ацетил-целлюлоза 308
Аэродинамика 474

Б

Базен 437
Барий 277
Барометрическая формула 475
Бахметев Б. А. 440, 453
Безу 97
Белки 309
Белоконь Н. И. 426, 427, 435, 594
Бензил хлористый 300
Бензол 299
Бензолсульфокислота 306
Бериллий 274
Бернулли 167, 201, 415, 417, 445, 510
Бертло 316
Бессель 171, 247, 250
Бесселевы функции 70
Бесконечно-большая 129
— малая 129
Бикарбонат натрия 275

Бикарбонат кальция 285
Бином Ньютона 101
Бинормаль 204
Биссектриса 108, 110
Бисульфит натрия 285
Бихромат калия 286
Блазиус 427
Больцман Л. 318, 510, 512, 529, 597
Бойль 531, 543
Бор 278
Бора 323
Борда 432
Борщев 349
Бочка 90
Брайтон 541
Браунит 287
Бриджмен 525, 527
Бройль 324
Бром 287

В

Вакуум 409, 448
Ван-дер-Ваальс 315, 316, 474, 475, 544, 545, 546
Валентность 259, 271, 273
Ванадий 283
Вариьона многоугольник 365
Ватерлиния 411
Вебер 480, 482
Вейерштрасс 160, 216
Веймаут 478
Вектор 207, 208, 210
— главный 361, 362, 363
— единичный 208
— компланарный 208
— момент 359
— неподвижный 207
— нулевой 207

Вектор свободный 207, 359
 — скользкий 207, 357
 — скорости 369
 — угловой скорости 372
 — ускорения 370
 — функция скалярного аргумента 210
 Вектора циркуляция 211
 — носитель 207
 Векторы коллинеарные 207
 Величина абсолютная 95
 — бесконечно-большая 129
 — малая 129
 — дискретная 224
 — непрерывная 224
 — случайная 224
 Величины комплексные 95, 129
 — обратные 15
 — постоянные 82
 Вероятность 222, 223, 224
 Вероятностей умножение 223
 Вершина кривой 196
 — угла 108
 Вес атомный 273
 — газов 405
 — жидкости 404
 — молекулярный 273
 — удельный 289, 293, 294
 Вещества поверхностно-активные 345
 — инактивные 345
 Видеман 574
 Вискозиметры 406
 Вискограмма 407
 Висмут 283
 Вихерт 399
 Вихрь 415, 416, 420
 Вогнутость кривой 195
 Вода гравитационная 469
 — грунтовая 469
 — и перегретый пар (по Вукаловичу М. Н.) 555
 — кипящая (свойства) 551
 — тяжёлая 320
 — (физические константы) 521, 524
 Водоизмещение 411
 Водород 275
 Водосливы 443
 Волновая теория 324
 Вольта ряд 495
 Вольт-секунда 480, 482
 Вольфрам 286
 Воск 305
 Восстановление 351
 Вронскиан 169
 Вронского определитель 169
 Вукалович М. П. 547, 548
 Вульф Г. В. 316
 Выпуклость кривой 195
 Выражение алгебраическое 95
 Высота 110, 113
 — метacentрическая 413
 Вычет функции 216
 Вязкость динамическая водяного пара и воды 521
 — жидкостей и газов 406, 407, 408, 525

Вязкость кинематическая водяного пара и воды 522
 — лиофильных коллоидов 353
 — лиофобных коллоидов 353
 — ртути 525
 — структурная 354

Г

Газ веселящий 282
 Газодинамика 474
 Газы благородные 275
 — движение по трубам 476
 — идеальные 315, 531
 — инертные 274
 — реальные 315, 531, 543
 — (свойства) 524, 532, 545
 Газен 472
 Гайд 521
 Галлерия водосборная 474
 Галилей 591
 Галлий 279
 Галоиды 269
 Гамильтон 212
 Гамма-функция 149
 Гангилье 438
 Гапон Е. Н. 322
 Гармоники высшие 506
 Гаусс 227, 228, 229, 255, 256, 480, 511
 Гаусманит 287
 Гафний 281
 Гей-Люссак 531
 Гели 350, 354, 355
 Гелий 274
 Гельмгольц 415, 527
 Гемфри 541
 Генри 328, 484
 Геометрия аналитическая 179
 — дифференциальная 194
 Германий 281
 Гиббс 345
 Гидрат окислов 274
 Гидродинамика идеальной жидкости 413
 — реальной (вязкой) жидкости 420
 Гидролиз 273, 351
 Гидростатика 408
 Гильберт 586
 Гипербола 86, 184, 198
 Гиперболоид 192
 Гипотенуза 109
 Гипоциклоида 202
 Гистерезис 482
 Глинозём 278
 Глицерин 301
 Глубина критическая 447, 450
 — сопряжённая 447
 Глюкоза 307
 Годнев И. 515
 Гончаров 440, 441
 Градиент пробивной 490
 Градус 108
 — условный 405
 Градусы вязкости 406
 Граммотом 273

Граммоль (граммолекулярный вес) 273
 Граммэквивалент 273
 График движения 368
 — прыжковой функции 456
 — скоростей 368
 Графит 279
 Грин 154, 176, 212
 Грифитс 589, 591
 Громека 417
 Грунт фиктивный 472
 Гюльден 147
 Гук 377

Д

Давление гидростатическое 408
 — избыточное 409, 410
 — капиллярное 344
 — молекулярное 343
 — на криволинейные стенки 411
 — парциальное 532
 — на плоские стенки 410
 — струи 415
 Даламбер 156, 159, 383
 Дальтон 532
 Дарси 435, 469, 470
 Движение абсолютное 370
 — Броуновское 351
 — винтовое 374
 — вихревое 415
 — в канале 439
 — в открытых руслах 449
 — грунтовых вод 469
 — изобарическое 477
 — изотермическое 476
 — изохорическое 476
 — ламинарное 423
 — неравномерное 449, 456
 — относительное 370
 — переносное 370
 — плавно изменяющееся 414
 — плоско-параллельное 372, 414
 — поступательное 371, 375
 — потенциальное 416, 422
 — равномерно замедленное 368
 — — ускоренное 368
 — сложное 370, 371
 — установившееся 414, 422, 471
 Дебай 318
 Девис 589, 591
 Дейтерий 320
 Дейтон 320
 Декалин 299
 Декарт 527
 Декартов лист 199
 Декремент затухания 203, 509
 Декстроза 307
 Деление тяжёлых ядер 323
 Делимость чисел 91
 Детерминанты 101
 Демокрит 510
 Деполяризация 341
 Дефекты массы 322
 Джоуль 527

Диагональ 109
 Диаграмма линейная или волновая 497
 — векторная 497
 — Кремоны 367
 — кристаллогидратов 333
 — состояния воды 332
 Дивинил 298
 Диаметр 113
 — кривой 184
 Дивергенция вектора 211
 Дизель 540
 Диметилкетон 303
 Дина 606
 Динамика 357, 375
 Динострат 203
 Диолефины 297
 Диполь 418, 487
 Диссоциация электролитическая 273
 Дистрибутивность 91
 Дирихле 162, 176
 Дифенил 299
 Дифференциал прямой 132, 134
 — дуги 194
 Дифференцирование (правила) 131, 144
 Дихлорэтан 300
 Длина эквивалентная 435
 Доливо-Добровольский 504
 Дополнение алгебраическое 101
 Дроби 92, 93, 97
 Дросселирование газов и паров 567
 Дублет 418
 Дуга 77, 113
 Дюкер 429

Е

Единица мнимая 99
 Единицы измерений 605
 — радиоактивности 321
 Ёмкость электрическая 488, 489
 — конденсаторов 489
 — аккумулятора 495
 Ермаков В. П. 157

Ж

Железо 288
 Жезл 202
 Жидкость газообразная 404
 — капельная 404, 405, 568
 — реальная 420
 — упругая 568
 Жиры 305
 Жуковский В. С. 591
 — М. И. 574
 — Н. Е. 459, 460, 470

З

Закон больших чисел 223
 — вращения 471
 — движения точки 368
 Закон действующих масс 335

Закон живой силы 415
 — количества движения 415
 — Коновалова 331
 — кратных отношений 272
 — Ляпунова 227
 — паев (эквивалентов) 273
 — постоянства сумм теплоты 325
 — постоянства состава 272
 — равной вероятности 227
 — распределения 226, 227, 335
 — — скоростей 425
 — Рауля 329, 330
 — смещения 321
 — сопротивления 467
 — сохранения механической энергии 383
 — — массы вещества М. В. Ломоносова 272
 — фильтрации 469
 — эквивалентности массы и энергии 322
 Замарин 472, 473
 Заряд остаточный 490
 — электрона 487, 494
 Звезды схема 493, 494
 Земли 269, 279
 Золи 350
 Золото 276

И

Иваненко Д. Д. 322
 Известь 277
 Излучение (теплопередача) 595
 — абсолютно чёрного тела 596
 — газов 601
 — различных поверхностей, степень черноты 597
 — серых тел 597
 Измерение углов 108, 113
 Изобары 271
 Изоклины 165
 Изоморфизм 317
 Изооктан 296
 Изотопы 271, 320
 Импульс силы 378
 Индий 279
 Индукция взаимная 484
 — магнитная 480
 — остаточная 482
 — электромагнитная 483
 Инволюта 196
 — сходимости 159
 Интервал 128
 Интеграл криволинейный 152
 — неопределённый 135
 — определённый 143
 — по поверхности 155
 Интегралы (основная таблица) 135
 — двойные 150
 — кратные 150, 152
 — несобственные 144
 — тройные 151
 — Эйлера 149
 — эллиптические 149

Интегрирование (правила) 136
 — алгебраических иррациональностей 137
 — гиперболических функций 141
 — рациональных дробей 136
 — — функций 136
 — трансцендентных функций 141
 — тригонометрических функций 139
 — численное 254
 Интерполирование 246
 — (формулы) 246, 247, 248
 — (коэффициенты) 249, 250
 — линейное 248
 — обратное 251
 — тригонометрическое 248
 Иод 287
 Ионы 273, 319, 339, 494
 Иоффе А. Ф. 318
 Иприт 306
 Иридий 293
 Истечение газов и паров 568, 570
 — из больших отверстий 462
 — — жел.-дор. цистерн 466
 — — малых отверстий 461
 — — резервуаров 568
 — — — неограниченной ёмкости 570
 — — — ограниченной ёмкости 572, 573
 — несжимаемых жидкостей при переменном уровне 465
 — — — при постоянном уровне 461
 — через затопленное и полузатопленное отверстие 463
 — через насадки 463
 Исчисление вариационное 177
 — дифференциальное 127
 — интегральное 135
 — операционное 171
 Итерация 237, 251
 Иттрий 279

К

Кадка 90
 Кадмий 278
 Калий 275
 Калий цианистый 280
 Калория 608
 Каллендер 566
 Каналы 439, 440, 442
 Кальций 277
 Капиллярность жидкостей 408
 Каратеодори 529
 Карбонаты 280
 Карбинол 301
 Кардан 104
 Кардиоида 200

Карно 529, 539, 566
 Касательная 113, 194
 Кассини 200, 201,
 Катализ 343
 Катет 109
 Катион 274, 494
 Катод 494
 Квадрат 112
 Квадратиса 203
 Квадратуры механиче-
 ские 254
 Квадраты чисел 15
 Квантовая теория тепло-
 ёмкости 318
 Кетоны 302
 Киловатт 607
 Килограмм 605
 Кинг 472
 Кинематика 357, 368
 Кинетика 342
 Кипения температура 289
 Кирпичёв М. В. 585
 Кирхгоф 584, 599
 Кирхгофа второй закон
 492, 503
 — первый закон 490,
 503
 — метод уравнений 492
 Кислород 284
 Кислотность среды 341
 Кислота бензойная 304
 — винная 309
 — карболовая 301
 — кремневая 280
 — лимонная 309
 — молочная 309
 — муравьиная 304
 — олеиновая 304
 — пальмитиновая 304
 — пикриновая 306
 — сернистая 285
 — синильная 280
 — соляная 286
 — стеариновая 304
 — сульфоновая 306
 — угольная 279, 309,
 — уксусная 304
 — щавелевая 304
 Кислоты 274
 — бескислородные 274
 — карбоновые 303
 Клапейрон 326, 530, 546
 Клаузиус 326, 510, 529,
 530, 546, 566
 Клеро 167
 Клетчатка 308
 Клин 88
 Коагуляция 352, 353
 Коалесценция 354
 Кобальт 288
 Козени 472, 473
 Колебания электромагнит-
 ные 596
 Коллебрук 427
 Коллоиды 349
 Количество движения 378
 Колодец водобойный 457
 — (приток воды) 473
 Кольцо круговое 85
 Комбинаторика 100
 Коммутативность 91
 Компоненты системы 331

Компрессор идеальный
 541, 543
 Конвекция 583
 — вынужденная 585
 — естественная 589
 Конденсатор 489
 Конденсация капилляр-
 ная 346
 Кондукция 574, 577
 Коновалов 331
 Консерватизм углов 217
 Конус 89, 116, 117, 192
 Конус трения 399
 Конхоида 199
 Координаты (определе-
 ния) 179, 180, 187
 — центра тяжести 146
 Корреляция 226
 Корень уравнения 103
 Кориолис 422, 424, 456
 Корни (радикалы) 15, 98
 Косинус 60
 Котангенс 60
 Котес 255
 Кох 547, 548, 590
 Коши 157, 159, 165, 167,
 175, 213, 214, 415, 417, 421
 Коэффициент 95
 — абсолютной вязкости 406
 — амплитуды 507
 — восстановления 486
 — вязкости кинемати-
 ческий 406
 — — воды 406
 — гидравлического со-
 противления 423, 425,
 428
 — диэлектрической среды
 488
 — затухания 509
 — искажения 507
 — корреляции 226
 — объёмного расшире-
 ния 405
 — отдачи 495
 — относительный диэлек-
 трический 487
 — поверхностного натя-
 жения 408
 — полезного действия ак-
 кумулятора 495
 — пропорциональности 94
 — расхода 428, 444, 445,
 446
 — самоиндукции 484
 — сжатия 405, 461
 — скорости 461
 — сопротивления 432
 — — в трубах 432
 — — задвижек 433
 — — клапанов 434
 — — конусов 435
 — — кранов 433
 — — приведённый 436
 — — различных тел 467
 — температурный 491
 — теплопроводности 574
 — — водяного пара 581
 — — газов 582
 — — жидкостей 579, 580
 — — различных мате-
 риалов 576, 577, 578

Коэффициент теплопровод-
 ности металлов 575
 Коэффициент трения различ-
 ных тел 399, 400, 402,
 403
 — — скольжения 398
 — фильтрации 472
 — формы 507
 — — сечения 456
 — шероховатости 437, 438
 Крахмал 308
 Крезолы 302
 Кремний 280
 Кремона 367
 Кривая логарифмиче-
 ская 203
 — подпора 449, 451
 — расстояний 368
 — свободной поверхности
 451, 452, 453, 454
 — скоростей 368
 — спада 449, 451
 Кризиса кривой 195, 205
 — поверхности 206, 207
 Кривые 2-го порядка 186,
 187, 192
 — плоские 194, 198
 Криптон 274
 Криоскопия 329
 Кристаллизация 351
 Критерий Рейнольдса 422
 — подобия 423, 467
 Круг 15, 84, 113
 — кривизны 196
 — сходимости 213
 Кручение кривой 205
 Крылов А. Н. 259, 357
 Ксенон 274
 Кузнецов Н. В. 587, 588
 Кулон 403
 Курбатов 519
 Куб 87, 115
 Кубы чисел 15
 Купоросы 285
 Кутателадзе С. С. 591
 Кюри 321

Л

Лагранж 131, 134, 167,
 246, 251, 413, 417, 418
 Лантаниды 269, 279
 Лаплас 171, 176, 212, 344
 416, 577
 Левкипп 510
 Лежандр 177
 Лейбензон Л. С. 460
 Лейбниц 157
 Лемб 417
 Лемниската 201
 Летучесть 338
 — вихревая 419
 Линия ломаная 108
 — геодезическая 207
 — кривизны 207
 — тока 414
 — цепная 203
 Липшиц 165
 Литвинов Д. А. 586
 Литий 275

Линувиль 214
 Лобачевский Н. И. 156, 240
 Логарифма характеристика 107
 Логарифмы 107
 Логарифмирование 107
 Логарифмы десятичные 35
 — натуральные 15, 107
 Локон Аньези 199
 Ломоносов М. В. 272, 511, 527
 Лопиталь 129, 132
 Лоран 215
 Лоренц 574
 Лучеиспускание слоя углекислоты 601
 — — водяного пара 602
 Лучи α 320
 — β 320
 — γ 320
 — Рентгена 321
 Ляпунов А. М. 227

М

Магний 276
 Магнит постоянный 483
 Маклорен 160, 252
 Максвелл 482, 510, 511, 512, 531
 Максимум 132
 Маннинг 429, 438, 439
 Мантисса 107
 Марганец 287
 Марков А. А. 223
 Мариотт 531
 Масса 375
 — электрона 487
 — электромагнитная 319
 Масс-спектрограф 320
 Математика 91
 Математическое ожидание величины 225
 Машина идеальная 529
 Маятник физический 385
 Медиана 110, 225, 226
 Медь 276
 Менделеев Д. И. 269, 316
 Металлоиды 269, 274
 Металлы 274
 — щелочные 269
 — щелочно-земельные 269
 Метан 296
 Метанол 301
 Метациентр 411
 Метод выбранных точек 231
 — ложного положения 239
 — наложения 493
 — наименьших квадратов 229, 232
 — неопределённых коэффициентов 97
 — обращения рядов 251
 — парабол 319
 — последовательных приближений 257
 — символический 503
 — средних 232
 — трансфигурации электрических цепей 493
 — холостого хода и короткого замыкания 493

Механика 357
 Минимум 132
 Минор 101
 Минута 108
 Михеев М. А. 585, 590
 Милликен Р. А. 318
 Мицелла 352
 Многогранник 115
 Многоугольник 84, 109, 112, 113
 — Вариньона 365
 — верёвочный 364
 — распределения 224
 — силовой 358
 Многочлен 96
 Множитель интегрирующий 165
 Мода 225, 226
 Модуль числа 95
 — комплексного числа 100
 — упругости 405
 Молекула 273, 316
 Молибден 286
 Момент изгибающий 365
 — главный 361, 362, 363
 — инерции 146, 147, 392, 394, 395, 396, 397
 — — осевой 393
 — — полярный 393
 — пары 359
 — кинетический 380
 — количества движения 380
 — силы 360
 — системы кинетический 380
 — статический 146
 — центробежный 393
 Моменты инерции некоторых однородных линий фигур и тел 394
 Моносахариды 307
 Монотропия 332
 Мочевина 309
 Мощность 385
 — электрического тока 492
 Мыла 305
 Мышьак 283

Н

Навье 421
 Наложение потоков 418
 Напор геометрический 409
 — гидростатический 409
 — пьезометрический 409
 Напряжение источника 417
 — разложения 342
 — электрическое 487, 490
 Напряжённость магнитного поля 482
 — электрического поля 487
 Насыщение магнитное 482
 Насадка 463
 Натр едкий 275
 Натрий 275
 Натяжение 408, 525
 — поверхностное 343, 345, 408
 Нафталин 299
 Нафены 296
 Нафтолы 302

Начало термодинамики второе 529
 — — первое 527
 Н-гептан 296
 Нейтральность среды 341
 Нейтрон 322
 Неон 274
 Непрерывность функций 130
 Неравенство 106, 107
 Никель 288
 Никурадзе 425
 Ниобий 284
 Нитрилы 304
 Нитробензол 306
 Нитроклетчатка 308
 Нитросоединения 306
 Нить вихревая 419
 Нихром 288
 Новиков И. И. 547
 Номограмма 262, 263, 265
 Номография 262
 Нормаль 194, 204
 Носитель вектора 207
 Ньютон 101, 239, 246, 249, 255, 357, 381, 385, 420
 Нуль-вектор 207
 Нуссельт 591

О

Обелиск 87
 Объём жидкостей 527
 Объём тела вращения 146
 Область существования функции 128
 — сходимости 159
 Обтекание тел 467
 Овал Кассини 200, 201
 Одночлен 95, 96
 Озон 284
 Окислы 274
 Окись углерода 280
 Окрестность точки 128
 Окружность 15, 113
 Оксалаты 304
 Олефины 297
 Олово 281
 Ом 483, 490, 491, 500, 503,
 Оператор Гамильтона 182
 Определитель 101, 169
 Орт 208
 Ортоцентр 110
 Осмос 330
 Основания 274
 Ось абсцисс 179
 — действительная 99
 — мнимая 99
 Осмий 292
 Октанта 188
 Остойчивость плавающего тела 413
 Остроградский М. В. 137, 155, 212
 Отделение корней уравнения 238
 Отверстие (гидравлические характеристики) 465
 Отношение 94
 Отображения конформные 216
 Отрезок 108, 128

П

- Павловский Н. Е. 439, 444, 453, 463, 470
 Палладий 288
 Пар водяной 546
 — сухой насыщенный 553, 554
 Пара сил 359
 Парабола 85, 198, 199
 Параболоид 90, 192
 Парадокс гидростатический 411
 Пара источник—сток 418
 Параллелограм 84, 112
 Параллелепипед 87, 115
 Параминобензолсульфокислоты 306
 Парафины 295
 Парахор 343
 Паскаль 200, 409
 Паули 324
 Пептизация 350
 Перекись водорода 275
 Переместительность 91
 Перемещение виртуальное 410
 Перемычки (фильтрация) 474
 Перестановки 100
 Периметр 109
 Периодическая система элементов Менделеева 269
 Периодический закон Менделеева 269
 Период переменного тока 497
 Периодичность тригонометрических функций 119
 Перестановка 100
 Пермаллой 482
 Петля гистерезиса 482
 Петров Н. П. 399
 Пинен 299
 Пирамида 115
 Пиридин 314
 Пиррол 310
 Пифагор 111
 Плавание тел 413
 Плавления температуры 289
 Планиметрия 108
 Планк 318, 529, 596
 Латина 293
 Пловучесть тел 412
 Плоскость 114, 189, 204, 206
 Плотность вероятности 224
 — жидкостей 404
 — тока 490
 — энергии электромагнитного поля 485
 Площадь криволинейного сектора 145
 — криволинейной трапеции 145
 — поверхности вращения 145
 Победит 288
 Поверхность 116, 145
 — тока 414
 — уровня 211, 409
 — эквипотенциальная 417
 Погрешность 163, 233
 Подвижность ионов 339
 Подкова 88
 Позитрон 322
 Покой жидкости 410
 Поле магнитное 480
 — направлений 165
 — потенциальное или безвихревое 212
 — скалярное 211
 — соленоидальное 212
 — электрическое 487
 — электростатическое 487
 Полиморфизм 317
 Полиномы 128, 248
 Полисахариды 308
 Полодия 373
 Полоний 285
 Полуинтервал 128
 Полусегмент 128
 Полюс 180, 215
 Поляризация 341
 — диэлектриков 487
 Порог концентрации 352
 Порядок кривой 181
 Последовательность нулевая 505
 — прямая 505
 — обратная 505
 Постоянная произвольная 135
 — универсальная газовая 315, 474, 531
 Постоянство растяжений 217
 Поташ 276
 Потенциал диффузионный 341
 — критический 352
 — скорости 417
 — термодинамический 327, 532
 — электрического поля 487
 — электродный 339
 Потенцирование 107
 Потери на гистерезис 485
 — на токи Фуко 486
 Поток бурный 447
 — вектора 211
 — магнитный 482
 — параллельный 418
 — плоско-параллельный 417
 — радиальный 417
 — спокойный 447
 — циркуляционный 418
 Потокосцепление магнитное 483
 Пояс шаровой 89
 Правило буравчика 480
 — значности 352
 — отбора 324
 — параллелограмма 358
 — фаз 331, 332
 Предел интеграла 143
 — функций 128, 129
 Прецесситат 283
 Призма 87, 115
 Признаки равенства треугольников 110
 — подобия треугольников 110
 Принцип сохранения вихрей 420
 Пробой диэлектрика 490
 Проводимость активная 501
 — ёмкостная 501
 — индуктивная 501
 — полная 501
 — реактивная 501
 — удельная 491
 Прогрессия 94, 95, 156
 Производная функции 130
 Производные высших порядков 131
 — определённого интеграла 144
 — частные 133
 Проницаемость магнитная 480
 — относительная диэлектрическая 487
 Пропанол 301
 Пропорция 94
 Протактиний 284
 Протеины 309
 Протон 320, 487
 Профиль русел составной 441
 — устойчивый 442
 Проценты 93
 Процесс адиабатный 536, 565
 — изобарный 535, 565
 — изотермический 536, 565
 — изохорный 535, 566
 — круговой 539, 566
 — политропный 537
 Прямая в пространстве 190
 Прямые 108, 114
 Прямоугольник 84, 112
 Птоломей 111
 Пуассон 176, 226
 Прыжок — волна 447
 — гидравлический 447, 456
 — поверхностный 447
 — совершенный 447

Р

- Работа 363, 381
 — электрического поля 492
 Равновесие безразличное 364
 — жидкостей 403, 410
 — неустойчивое 364
 — плавающих тел 413
 — сил 358
 — системы 363
 Радиана 76, 117
 Радий 277
 Радикалы 98
 Радиоактивность 320
 Радиус-вектор 369
 Радиус метacentрический 413
 — кривизны 196, 205
 — кручения 205
 — окружности 113
 — сходимости 159, 213
 Радон 274
 Развёртка кривой 196
 — окружности 203
 Разложение силы 358
 Размещение 100
 Разность конечная 224

Разность контактная 495
 — потенциалов 490, 494
 Разряд периодический 509
 Распад урана цепной 323
 Распределительность 91
 Растворы 328
 Расчёт гидравлический каналов 439
 Расчёты стехиометрические 273
 Расширение внезапное 432
 — линейное 526
 — объёмное 527
 Расход жидкости 414
 — непрерывный 430
 — путевой 431
 — транзитный 431
 Рауль 329; 330
 Реакция гомогенная 336
 — гетерогенная 336
 — окислительно-восстановительные 273
 Редкие земли 279
 Режим второй критический 448
 — ламинарный 423
 — первый критический 448
 — турбулентный 425
 Резервуары (время опорожнения) 466
 Резонанс напряжений 502
 — токов 502
 Рейнольдса критерий 422
 — параметр 423
 Рений 288
 Решение треугольников 123, 124
 Решётки 317
 Риккати 167
 Риман 158, 175, 213
 Родий 288
 Розерфорд 322, 323
 Роль 131
 Ромб 84, 112
 Ротор 416
 Ртуть 278
 Рубидий 276
 Рунге 258, 506
 Русло естественное 442
 Рутений 288
 Ряды бесконечные 156
 — (действия) 158
 — знакопеременные 157
 — Маклорена 160
 — Тейлора 160
 — термоэлектрический 496
 — функций 159
 — Фурье 162, 506
 — числовые 95, 156

С

Сабатэ 540
 Савар 480, 510
 Самоиндукция 484
 Саррюс 102
 Сахар виноградный 307
 — тростниковый 308
 Сахароза 308
 Свердлин А. 515
 Свинец 281

Связи идеальные 363
 Сегмент 77, 85, 89
 — круга 113
 — шаровой 117
 Седиментация 352
 Сектор 85, 89
 — круга 113
 — шаровой 117
 Секунда 108
 Селитра 282
 Семейства радиоактивные 321
 Сера 284
 Серебро 276
 Сероводород 285
 Сероуглерод 280
 Серп 85
 Серре 205
 Сечение живое 414
 Сжимаемость капельных жидкостей 405
 Сила внешняя 378
 — внутреннего трения 406
 — внутренняя 378
 — давления жидкости 412
 — живая 381, 415
 — коэрцитивная 482
 — магнитодвижущая 483
 — подъёмная подковообразного электромагнита 486
 — термоэлектродвижущая 495
 Силикаты 280
 Символика химическая 273
 Сименс 491
 Синельников 587
 Синерезис 355
 Синусоида 86
 Система гомогенная 331
 — гетерогенная 331
 — многофазная 504
 Системы двухкомпонентные 332
 — коллоидные 349
 — кристаллические 316
 — однокомпонентные 332
 — трёхкомпонентные 334
 Сифон 428
 Скаляры 207
 Скандий 279
 Скнуарь Н. А. 589
 Скобельцин Д. В. 322
 Скорость комплексная 419
 — осреднённая местная 414
 — предельная 376
 — угловая 371, 372
 Слихтер 472
 Сложение вероятностей 223
 — параллельных сил 358
 Слой шаровой 117
 Смеси газовые 532, 533, 534
 — охладительные 334
 Смесь жидкости и газа (движение по трубам) 478
 Смолуховский М. 529
 Сода 275
 Соединение в звезду 504
 — параллельное (трубопроводов) 430

Соединение последовательное 491
 — последовательное (трубопроводов) 429
 — смешанное 505
 — треугольником 504
 Соединения 100
 — гетероциклические 309
 — конденсаторов 489
 — параллельные 492
 Соли 274
 Сопротивление активное 498
 — местное 432
 — полное 501
 — проводников 492
 — удельное 490
 — электрическое 490
 Состояние метастабильное 467
 Сосуды сообщающиеся 410
 Сочетания 100
 Сочетательность 91
 Спираль Архимеда 202
 — гиперболическая 202
 — логарифмическая 202
 — параболическая 202
 Спирты 300, 301
 Среда дисперсионная 350
 Сродство химическое 336
 Стантон 482, 531
 Статика 357
 Стекло 280
 Стенка водосбойная 457
 Степень 15, 98
 — диссоциации 273
 Стереометрия 114
 Стирлинг 129, 247, 250
 Стирол 299
 Стокс 155, 212, 420, 421
 Столетов А. Г. 496
 Стрелка дуги 77, 113
 Стронций 277
 Строфоид 199
 Струйка 414
 Сфера 117
 Сходимость 158
 Сужение внезапное 432
 Сулема 278
 Сульфиды 306
 Сульфокислоты 306
 Суперпозиция 418
 Суперфосфат 283
 Сурик 281
 Сурьма 283
 Суспензии 350

Т

Таллий 279
 Тантал 284
 Тареев В. М. 570
 Тейлор 132, 160, 215, 257
 Теллур 285
 Тело абсолютно твёрдое 357
 — вращения 146
 — диамагнитное 481
 — парамагнитное 481
 — ферромагнитное 481
 Теорема единственности 214
 — о конечном приращении 131

- Теорема основная алгебры 96
 — тепловая 337
 Теплоёмкость (определение) 513
 — газов 532, 533
 Теплоёмкости жидкости 519
 — истинные 515
 — перегретого водяного пара 549
 — истинные при постоянном давлении 515
 — крантовая теория 318
 — средние 513, 515, 516, 518
 — твёрдых тел 317, 520
 Теплообмен излучением между твёрдыми телами 599, 600
 Теплоотдача 585, 586, 587, 589,
 — плит 591
 — при кипении жидкостей 592
 — — конденсации 591
 — труб 585, 586, 587, 589
 Теплопередача излучением 595
 — конвективная 583
 — кондуктивная 574
 — радиационная 595
 Теплопроводность 574
 Теплота горения 325
 — нейтрализации 325
 — сорбции 346
 — разведения 325
 — растворения 325
 Термоэлектричество 495
 Тетралин 299
 Тетрахлорметан 300
 Тетраэдр 115
 Тиксотропия 355
 Тимрот Д. Л. 519
 Тиоспирты 306
 Тиофен 314
 Тиофенолы 306
 Тиоэфиры 306
 Титан 281
 Тожество 95
 Ток активный 501
 — переменный 497, 506
 — постоянный 490
 — реактивный 501
 Тор 89
 Торий 282
 Точки особые 197, 215
 — изоэлектрическая 352
 — перегиба 195
 Трактриса 203
 Траектория струй 462
 Трансверсальность 178
 Транспозиция 485
 Трапедия 84, 112, 145
 Требин Ф. А. 478
 Трение 398, 399, 400, 401, 402, 403
 Треугольник 83, 109, 110, 111
 Трёхгранник сопровождающий 204
 Триады 269
 Тригонометрия сферическая 127
 Триптан 296
 Трохоида 201
 Труба всасывающая 429
 — самотёчная 429
 Трубка вихревая 419
 Трубопровод длинный 429
 — короткий 428
 — эквивалентный 430
 Трубы концентрические 424
 — незаполненные (расчёт) 442
 — прямоугольные 424
 У
 Угледороды 295
 Углеводы 307
 Углерод 279
 Угол 108, 109, 113, 114
 — поворота 371, 372
 — полярный 180
 — смежности 196
 — трения 399
 Удар гидравлический в трубопроводах 459
 — жидкости 458, 459
 — неупругий 387
 — прямой 387
 — совершенно упругий 387
 — упругий 387
 — центральный 387
 Уклон гидравлический 423
 — критический 450
 Улитка Паскаля 200
 Ульзамер 587
 Ультрамикроскоп 351
 Универсальная газовая постоянная 315, 474
 Уравнение гидростатики Эйлера 409
 — движения грунтовых вод 470
 — двучленное 104
 — состояния газов 474
 — состояния идеального газа 315, 531
 — статики тяжёлых газов 475
 — трёхчленное 104
 — химическое 273
 Уравнения (алгебраические) 95, 103
 — дифференциальные 165
 — — Бесселя 171
 — — в полных дифференциалах 165
 — — в частных производных 174
 — — высших порядков 167
 — — высших степеней 167
 — — допускающие понижение порядка 168
 — — квадратные 103
 — — Клеро 167
 — — Лагранжа 167
 — — линейные 166, 169
 — — второго порядка 174
 — — — неоднородные 169
 — — — однородные 169
 — — — однородные 166
 • Уравнения дифференциальные 1-го порядка 165
 — — Риккати 167 (системы) 105
 — — с разделяющимися переменными 166
 — — теплопроводности 176
 — — Эйлера 170
 Уран 286
 Усадка линейная 527
 Ускорение 368, 370, 371, 372
 Устойчивость агрегативная 488
 Участок начальный труб 424
 Ф
 Фаза дисперсная 350
 Фарада 488
 Фарадей 338, 494
 Фёдоров Е. С. 316
 Фенантрен 299
 Фенолы 300, 301
 Ферма 366
 Ферромагнетизм 482
 Фокусы эллипса 184
 Формфактор 507
 Формула барометрическая 475
 Формулы эмпирические 230
 Фосген 309
 Фосфор 282
 Фотоэлектричество 496
 Фотоэлемент 496
 Фотоэффект 496
 Френе 205
 Фруда параметр 423
 Фруктоза 307
 Фтор 286
 Фуко токи 486
 Функции Бесселя 81
 — гиперболические 79, 125, 126
 — комплексного переменного 212
 — многих переменных 132
 — обратные тригонометрические 122
 — показательные 79
 — трансцендентные 213
 — тригонометрические 54, 117, 126
 Функция алгебраическая 128
 — аналитическая 213, 214, 215
 — возрастающая 132
 — иррациональная 128
 — многозначная 128
 — монотонная 132
 — напорная 470
 — независимой переменной 128
 — неявная 128
 — одной переменной 127
 — первообразная 135
 — рациональная 128
 — степенная 219
 — тока 415
 — трансцендентная 128
 — убывающая 132

Функция характеристическая (в гидромеханике) 419

Элементарная 128

— явная 128

Фуран 310

Фурфурол 303

Фурье 162, 176, 506, 574, 584

Х

Хайлов М. А. 515

Характеристика логарифма 107

Хемосорбция 346

Хлор 287

Хлорбензол 300

Хлорметан 300

Хлороформ 300

Хорда 77, 113

Христианович С. А. 478

Хром 285

Хроматы 286

Ц

Цезий 276

Целлюлоза 308

Цемент 281

Центр водоизмещения 411

— давления 411

— кривизны 196

— мгновенный 372, 373

— окружности 113

— параллельных сил 359

— приведения 361, 362

— тяжести 146, 147, 359, 390, 391, 392

— удара 390

Цепи Маркова 223

— химические 341

Цепь магнитная 483

Цикл Брайтона 541

— Гемфри 541

— Дизеля 540

— Карно 529, 539, 566

— Отто 539

— Ренкина—Клаузиуса 566

— Сабатэ 540

— термодинамический 539

Цикланы 296

Циклогексан 297

Циклонда 201

Циклопентан 297

Циклотрон 322

Цинк 277

Цирконий 281

Цилиндр 88, 116, 193

Циркуляция вектора 211

— скорости 416

Циссоида 199

Цистерна железнодорожная (истечение нефтепродуктов) 466

Ч

Чан 90

Чарный И. А. 443, 460, 466

Частные производные 133

Частота переменного тока 497

— резонансная 502

— события 222

Чашихин 587

Чебышев П. Л. 139, 223, 248, 251, 255, 256

Черинкин В. И. 428, 478

Четырёхугольник 83, 111

Числа 91, 99

Ш

Шак 601, 602

Шар 89

Шарнир опорный 366

Шези 437

Шероховатость труб 426

Шиллер Н. 529

Шкала атомных весов 320

Шкала функциональная 262

Шмидт 515, 591

Шор 521

Щ

Щелкачев В. Н. 470

Щёлочность среды 341

Щёлочь 274

Э

Эбулиоскопия 329

Эвольвента 196

Эволюта 196

Эвтектика 333

Эйгенсон Л. С. 587

Эйлер Л. П. 139, 170, 177, 178, 179, 213, 252, 258, 260, 413, 417, 458

Эйнштейн 318, 353

Эквивалент 273

— механический тепла 492

— электрохимический 494

Экстремаль 177

Экстремум 132, 134, 177, 178

Электричество контактное 495

Электрод 340

Электролиз 338, 494

Электролиты 273, 338, 339, 494

Электрон 318, 487

Электрон-вольт 319

Электроосмос 352

Электропроводность газов 497

— молекулярная 339

— эквивалентная 339

Электрофорез 351

Электрохимия 338

Элементы гальванические 339, 494

— нормальные 339

— обратимые 340

— типические 269

Эллипс 86, 184

Эллипсоид 90, 192

— инерции 394

Эмиссия термоэлектронная 496

Эмульсии 354

Энантиотропия 332

Энгельс 527, 529

Энергия внутренняя 327, 530

— кинетическая 381, 383

— магнитного поля 485

— свободная 327, 337, 530

— сечения 447

— электрического поля 488

Энтальпия 327, 530

Эпициклоида 201

Эренфест 529

Эрстед 482

Этан 296

Этанол 301

Этилен 297

Этиленгликоль 301

Этилмеркаптан 306

Этин 298

Эффект поверхностный 498

— реакции тепловой 325

Ю

Юсти 515

Я

Яблонский В. С. 466

Явление неправильных рядов 352

— привыкания 352

Ядро 271, 321

— атома 487

Якоб 592

Якоби Б. С. 494

Ясюкевич 428

Техн. редактор *Д. М. Юдзон*
Художник *Б. В. Шварц*

Отпечатано с матриц
Бумага $70 \times 108^{1/8} / 1,6 = 19^{1/2}$ бумажных —
53,43 печатного листа. Уч.-изд. 82 л.
ЖДИЗ 76521. Зак. тип. 1387.
Т 01792. Тираж 5 000 экз.

1-я тип. Трансжелдориздата МПС.