

**В.В. ФИЛИППОВ, В.Д. ИЗМАЙЛОВ**

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ  
ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

**Справочник**

**Самара**  
**Самарский государственный технический университет**  
**2021**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

Кафедра «Химическая технология и промышленная экология»

В.В. ФИЛИПОВ, В.Д. ИЗМАЙЛОВ

# ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

*Справочник*

Самара  
Самарский государственный технический университет  
2021

Печатается по решению методического совета института нефтегазовых технологий (протокол № 4 от 28.10.2020 г.).

УДК 66.02(035)

ББК 35.11я2

Ф 53

**Филиппов В.В.**

**Процессы и аппараты химической технологии:** справочник / *В.В. Филиппов, В.Д. Измайлов.* – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2021. – 54 с.

Предназначен для использования студентами при выполнении расчётов по дисциплинам «Процессы и аппараты химической технологии» и «Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии».

Рецензент: канд. хим. наук, доцент *Б.Ю. Смирнов*

УДК 66.02(035)

ББК 35.11я2

Ф 53

© В.В. Филиппов, В.Д. Измайлов, 2021

© Самарский государственный  
технический университет, 2021

## ВВЕДЕНИЕ

При выполнении расчётов по «Процессам и аппаратам» обязательно возникает потребность в нахождении свойств веществ, участвующих в процессе, и параметров проектируемых аппаратов. Использование возможностей Интернета существенно упрощает эту задачу. Достаточно забить в любом поисковике, например, «плотность гексана при 40 градусах», как за долю секунды будет получено несколько тысяч ответов. Понятно, что для этого требуется иметь устройство с выходом в Паутину и с удобным для работы экраном. Наш опыт преподавания показал, что, несмотря на все преимущества Интернета, студентам комфортнее работать с бумажным носителем информации, в котором собраны основные сведения. С этой целью было принято решение повторить ранее выпущенный справочник, дополнив его некоторыми короткими сведениями из теории. И, самое главное, авторы хотели обратить внимание пользователей данного справочника на единицы измерения величин, которые необходимо использовать в технологических расчётах.

## СТРУКТУРА СПРАВОЧНИКА

Перед таблицей каждого приведённого в справочнике свойства представлены основные сведения по этому свойству и единицы его измерения. Таблица 1 – перечень приведённых свойств с номерами таблиц и страниц.

### О СИСТЕМЕ ЕДИНИЦ СИ

За свою долгую историю человечество придумало великое множество единиц измерения различных величин. Например, только для измерения длины применяются десятки, если не сотни, единиц: метры, километры, сантиметры, миллиметры, мили, ярды, футы и многие другие. Так и хочется воскликнуть – какой ужас! А ведь все эти единицы длины порождают свои единицы площади и объёма.

Понятно, что для выполнения расчётов требуется договориться, в каких единицах мы эти расчёты будем выполнять. И такой «договор» был заключён в 1960 году, когда страны договорились о создании Международной системы единиц физических величин, современного варианта метрической системы.

Для обычной жизни система СИ, прямо скажем, неудобна. Но вот для технических расчётов она просто идеальна. Поэтому мы настоятельно советуем студентам быть внимательными при подстановках в формулы чисел и проверять, выражены ли они в системе СИ. Малейшее отклонение от неё приведёт к неверным результатам. А так как опыта расчётов и анализа полученных результатов у студентов нет, то, например, расчётная скорость жидкости в трубопроводе, превышающая скорость звука, не вызывает сомнения.

Часто можно слышать такое суждение: «я считал на компьютере по программе, поэтому ошибки исключены». Компьютер оперирует с теми значениями, которые были введены в соответствующие ячейки. Вот на этой-то стадии и возникает проблема. Ввёл не то число – и компьютер выдал неверный результат.

## Перечень справочных материалов

Перечень справочных материалов		табл. 1	с. 5
Химическая формула, молярная масса и нормальная температура кипения		табл. 2	с. 6
Плотность жидкостей в зависимости от температуры		табл. 3	с. 9
Вязкость	жидкости	табл. 4	с. 12
	газы	рис. 2	с. 13
Теплоёмкость	жидкости	рис. 3	с. 15
	газы	табл. 7	с. 18
Теплопроводность	жидкости	рис. 4	с. 19
	газы и пары	рис. 5	с. 21
Удельная теплота парообразования	жидкости	табл. 10	с. 24
		рис. 6	с. 25
	газы и пары	рис. 7	с. 26
Давление насыщенного пара	жидкости	рис. 8	с. 28
Удельная теплота парообразования	жидкости	табл. 14	с. 30
Давление насыщенного пара	жидкости	табл. 15, 16	с. 32, 33
Коэффициенты уравнения Антуана		табл. 17	с. 35
Свойства воды		табл. 18	с. 36
Свойства насыщенного водяного пара		табл. 19	с. 37
Ориентировочные значения коэффициента теплопередачи		табл. 20	с. 40
Средние значения тепловой проводимости загрязнений стенки		табл. 21	с. 42
Диаметры условного прохода штуцеров кожухотрубчатых теплообменников		табл. 22	с. 43
Основные характеристики теплообменников и холодильников		табл. 23, 24	с. 44, 46
Параметры кожухотрубчатых конденсаторов и испарителей		табл. 25	с. 49
Параметры кожухотрубчатых испарителей с паровым пространством		табл. 26	с. 50
Зависимость коэффициента трения $\lambda$ от критерия Рейнольдса		рис. 9	с. 39

Все приведённые в справочнике сведения взяты из [1] и [2].

## Химическая формула вещества, его молярная масса и нормальная температура кипения [1, 2]

№ п/п	Химическое соединение и его формула	Моляр. масса, кг/кмоль	Темп. кипен. °С	№ п/п	Химическое соединение и его формула	Молярн. масса, кг/кмоль	Темп. кипен., °С
1	Ацетон $C_3H_6O$	58,08	56	13	Октан $C_8H_{18}$	114,23	112,0
2	Бензол $C_6H_6$	78,11	80,2	14	Пентан $C_5H_{12}$	72,15	36,1
3	Бутиловый спирт $C_4H_{10}O$	74,12	117,7	15	н-Пропанол(Пропанол-1) $C_3H_8O$	60,09	97,4
4	Гексан $C_6H_{14}$	86,18	68,7	16	Серовуглерод $CS_2$	76,13	46,3
5	Гептан $C_7H_{16}$	100,2	98,4	17	Толуол $C_7H_8$	92,13	110,8
6	Дихлорэтан $C_2H_4Cl_2$	98,97	83,7	18	Уксусная кислота $C_2H_4O_2$	60,05	117,9
7	Диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	74,12	34,5	19	Хлорбензол $C_6H_5Cl$	112,56	131,7
8	Изопропанол $C_3H_8O$	60,09	82,4	20	Хлороформ $CHCl_3$	119,38	61,2
9	м-Ксилол $C_8H_{10}$	106,16	138,1	21	Четырёххлористый углерод $CCl_4$	153,84	76,7
10	Метанол $CH_3OH$	32,04	64,7	22	Этилацетат $C_4H_8O_2$	88,10	77,1
11	Метилэтилкетон $CH_3COC_2H_5$	72,12	79,6	23	Этанол $C_2H_5OH$	46,07	78,3
12	Муравьиная кислота $CH_2O_2$	46,03	100,6				

## ПЛОТНОСТЬ

Плотность – это масса единицы объёма. Масса в системе СИ измеряется в килограммах, объём в кубических метрах. Поэтому единицей измерения плотности является  $\text{кг/м}^3$ .

Обозначать плотность принято греческой буквой  $\rho$ , массу – буквой  $m$ , объём –  $V$ . Тогда можно записать формулу для расчёта плотности

$$\rho = \frac{m}{V}, \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]. \quad (1)$$

Плотность абсолютно всех жидкостей и газов с ростом температуры уменьшается<sup>1</sup>. Это объясняется увеличением объёма при повышении температуры. Температура растёт  $\rightarrow$  знаменатель формулы (1) увеличивается  $\rightarrow$  дробь уменьшается.

Для обычных капельных жидкостей плотность находится только по справочнику (табл. 3). Как правило, их плотности имеют значения плотности порядка  $600\text{--}1500 \text{ кг/м}^3$ .

Для технологических расчётов находить плотность жидкости именно при требуемой температуре особого смысла нет. Например, если температура бензола  $53 \text{ }^\circ\text{C}$ , то вполне достаточно взять для расчёта плотность при  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для газов и паров искать плотность в справочнике бессмысленно – её там нет. Их плотность довольно просто рассчитывается из уравнения Клапейрона – Менделеева:

$$\rho = \frac{M}{22,4} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} = \frac{M}{22,4} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{273 + t}, \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right], \quad (2)$$

где  $M$  – молярная масса газа (пара), для смеси газов находится по правилу аддитивности, имеет размерность  $\text{кг/кмоль}$ ;

$P$  – абсолютное давление газа;

---

<sup>1</sup> Исключение составляет плотность воды вблизи  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ : при охлаждении воды от  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  её объём начинает аномально увеличиваться, а плотность – уменьшаться. В технике такое поведение воды порождает много проблем. Но для живой природы это её свойство – величайшее благо.



$T$  – абсолютная температура, К;

$P_0$  и  $T_0$  – стандартные давление и температура:

$$P_0 = 100000 \text{ Па} = 1 \text{ бар};$$

$$T_0 = 273 \text{ К}.$$

В формуле (2) давление можно подставлять в любых, но обязательно одинаковых единицах.

В нефтепереработке часто используется относительная плотность – это отношение плотности данного нефтепродукта при 20 °С к плотности воды при 4 °С<sup>2</sup> (величина безразмерная).

---

<sup>2</sup> Плотность воды при 4 °С практически равна 1000 кг/м<sup>3</sup> – хорошие специалисты это помнят.

## Плотность органических жидкостей в зависимости от температуры

№ п/п	Жидкость	Температура, °С											
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	130	150
<b>Предельные углеводороды</b>													
1	Гексан	660	650	641	631	622	612	602	592	581	559	548	526
2	Гептан	681	672	663	654	645	638	627	618	607	588	578	558
3	Октан	702	694	686	677	669	661	653	644	635	617	608	590
4	Пентан	639	628	619	608	599	586	578	566	555	530	518	494
<b>Ароматические углеводороды и их производные</b>													
5	Бензол	879	869	858	847	836	826	815	804	793	769	757	733
6	м-Ксилол	865	856	847	839	831	822	813	805	796	778	769	751
7	Толуол	866	856	847	838	828	818	808	798	788	766	755	733
8	Хлорбензол	1107	1096	1085	1075	1065	1053	1041	1031	1021	995	982	956
<b>Спирты и органические кислоты</b>													
9	Бутиловый спирт	810	802	795	788	781	774	766	758	751	735	727	711
10	Изопропиловый спирт	785	777	768	760	752	744	735	726	718	700	682	665
11	Метиловый спирт	792	783	774	765	756	746	736	725	714	692	681	659
12	Муравьиная кислота	1220	1207	1195	1183	1171	1159	1141	1134	1121	1096	1084	1059
13	н-Пропиловый спирт	804	796	788	779	770	761	752	743	733	711	700	688
14	Уксусная кислота	1048	1037	1027	1016	1004	993	981	969	958	922	904	868
15	Этиловый спирт	789	780	772	763	754	744	735	726	716	693	681	658
<b>Эфиры, кетоны, серо- и хлорсодержащие соединения</b>													
16	Ацетон	791	780	768	757	746	732	719	706	693	665	651	623
17	Дихлорэтан	1254	1239	1224	1209	1194	1179	1163	1148	1133	1102	1087	1056
18	Диэтиловый эфир	714	701	689	678	666	653	640	626	611	576	559	524
19	Метилацетат	934	921	908	894	879	863	846	829	812	777	760	740
20	Серовуглерод	1263	1248	1233	1216	1200	1182	1165	1145	1125	1082	1060	1017
21	Хлороформ	1489	1470	1450	1431	1411	1395	1380	1353	1326	1280	1257	1211
22	Четырёххлористый углерод	1594	1575	1556	1537	1517	1494	1471	1452	1434	1390	1368	1324
23	Этилацетат	901	889	876	864	851	838	825	811	797	768	753	724

## ВЯЗКОСТЬ

Вязкость или внутреннее трение – это свойство текучих тел, т.е. жидкостей и газов, оказывать сопротивление перемещению.

Это очень важное свойство – на преодоление сил вязкости нам приходится затрачивать энергию. Поэтому одна из важнейших задач раздела «Техническая гидравлика» курса «Процессы и аппараты» – это умение рассчитывать потери энергии на преодоление вязкости.

Численно оценить величину вязкости, т.е. внутреннего трения, можно двумя коэффициентами. Первый – динамический коэффициент вязкости  $\mu$ , который появляется в законе внутреннего трения Ньютона. Второй – кинематический коэффициент вязкости  $\nu$ , который связан с динамическим коэффициентом вязкости соотношением

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости (газа).

В системе СИ коэффициент динамической вязкости  $\mu$  измеряется в Па $\times$ с. Прямо скажем – это крайне неудобная величина. Она слишком крупная. Например, можно ли измерять диаметр карандаша в километрах? Конечно, можно. Но удобно? Нет, очень неудобно. Получится очень маленькое значение. Вот так и с Па $\times$ с. Поэтому ради удобства используют мПа $\times$ с, т.е. значения в 1000 раз меньшие. Но в расчётные формулы нужно подставлять значение вязкости именно в Па $\times$ с. Иначе получится абсолютно дикий, неверный результат.

Ещё одна типичная ошибка. Например, нужно поместить в ячейку таблицы значение вязкости  $\mu = 0,00046$  Па $\times$ с (рис. 1). Занимать узкую ячейку нулями глупо. Поэтому величину вязкости умножают на 1000, результат 0,46 помещают в ячейку, но в шапке столбца указывают, что вязкость умножили на 1000:  $\mu \cdot 10^3$ . Следовательно, пользователю справочника **необходимо значение из ячейки разделить на 1000**. Однако пользователь часто вместо деления числа 0,46 умножа-

ет его на 1000 и получает значения вязкости 460 Па×с. Получившийся результат расчёта будет находиться за гранью здравого смысла.

### Шапка таблицы

$\mu, \text{мПа} \times \text{с}$	или	$\mu \cdot 10^3, \text{Па} \times \text{с}$
0,46		0,46

Правильно  $\mu = 0,00046 \text{ Па} \times \text{с}$     Неправильно  $\mu = 460 \text{ Па} \times \text{с}$

*Рис. 1.* Интерпретация шапки таблицы

Сказанное относится и к графикам и номограммам.

Несколько слов про кинематический коэффициент вязкости. Этот коэффициент измеряется в  $\text{м}^2/\text{с}$ . А его величина на три порядка меньше, чем у динамического коэффициента. Поэтому для удобства коэффициент кинематической вязкости выражают в  $\text{мм}^2/\text{с}$ . Но в расчётах необходимо пользоваться только системой СИ.

У нефтепереработчиков принято пользоваться так называемой условной вязкостью. Условная вязкость – величина, косвенно характеризующая гидравлическое сопротивление течению, измеряемая временем истечения заданного объёма раствора через вертикальную трубку определённого диаметра. Измеряют в градусах Энглера (по имени немецкого химика К.О. Энглера), обозначают °ВУ. Мы в наших расчётах этой величиной не пользуемся.

И последнее. При увеличении температуры вязкость обычных жидкостей уменьшается – об этом мы знаем из житейского опыта. А вот вязкость газов, наоборот, увеличивается. Интересно, что давление в разумных пределах (примерно до 60 ат) мало влияет на вязкость газа, и этим влиянием в расчётах можно пренебречь.

Ниже приведены вязкости жидкостей (табл. 4 и номограмма рис. 2) и газов (номограмма рис. 3).

Таблица 4

## Динамический коэффициент вязкости органических жидкостей при различных температурах, мПа×с

№	Жидкость	Температура, °С											
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	130	150
<b>Пределные углеводороды</b>													
1	Гексан	0,32	0,29	0,264	0,241	0,221	0,206	0,19	0,174	0,158	0,132	0,119	0,093
2	Гептан	0,45	0,41	0,37	0,32	0,29	0,27	0,24	0,22	0,21	0,18	0,17	0,14
3	Октан	0,54	0,479	0,428	0,386	0,35	0,321	0,291	0,268	0,245	0,208	0,19	0,172
4	Пентан	0,25	0,23	0,21	0,19	0,18	0,17	0,155	0,14	0,13	0,115	0,11	0,09
<b>Ароматические углеводороды и их производные</b>													
5	Бензол	0,65	0,56	0,492	0,436	0,39	0,353	0,316	0,289	0,261	0,219	0,198	0,156
6	м-Ксилол	0,61	0,56	0,50	0,46	0,43	0,39	0,35	0,33	0,29	0,25	0,23	0,20
7	Толуол	0,586	0,522	0,466	0,42	0,381	0,350	0,319	0,295	0,271	0,231	0,211	0,171
8	Хлорбензол	0,80	0,71	0,64	0,57	0,52	0,478	0,435	0,403	0,37	0,32	0,295	0,245
<b>Спирты и органические кислоты</b>													
9	Бутиловый спирт	2,95	2,28	1,78	1,41	1,14	0,95	0,76	0,65	0,54	0,38	0,30	0,14
10	Изопропиловый спирт	2,39	1,76	1,33	1,03	0,80	0,66	0,52	0,45	0,38	0,29	0,245	0,155
11	Метиловый спирт	0,584	0,51	0,45	0,396	0,351	0,321	0,29	0,265	0,24	0,21	0,195	0,165
12	Муравьиная кислота	1,78	1,46	1,22	1,03	0,89	0,785	0,68	0,61	0,54	0,40	0,33	0,19
13	Уксусная кислота	1,22	1,04	0,90	0,79	0,70	0,63	0,56	0,51	0,46	0,37	0,325	0,235
14	Этиловый спирт	1,19	1,00	0,825	0,701	0,591	0,513	0,435	0,381	0,326	0,248	0,209	0,131
<b>Эфиры, кетоны, серо- и хлорсодержащие соединения</b>													
15	Ацетон	0,322	0,293	0,268	0,246	0,230	0,215	0,20	0,185	0,17	0,15	0,14	0,12
16	Дихлорэтан	0,84	0,74	0,65	0,565	0,51	0,465	0,42	0,39	0,36	0,31	0,285	0,235
17	Диэтиловый эфир	0,243	0,22	0,199	0,182	0,166	0,153	0,14	0,129	0,118	0,10	0,091	0,073
18	Сериуглерод	0,366	0,319	0,29	0,27	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,17	0,16	0,14
19	Хлороформ	0,57	0,51	0,466	0,426	0,39	0,36	0,33	0,31	0,29	0,26	0,245	0,215
20	Четырёххлористый углерод	0,97	0,84	0,74	0,65	0,59	0,531	0,472	0,430	0,387	0,323	0,291	0,27
21	Этилацетат	0,449	0,40	0,36	0,326	0,297	0,273	0,248	0,229	0,21	0,178	0,162	0,13

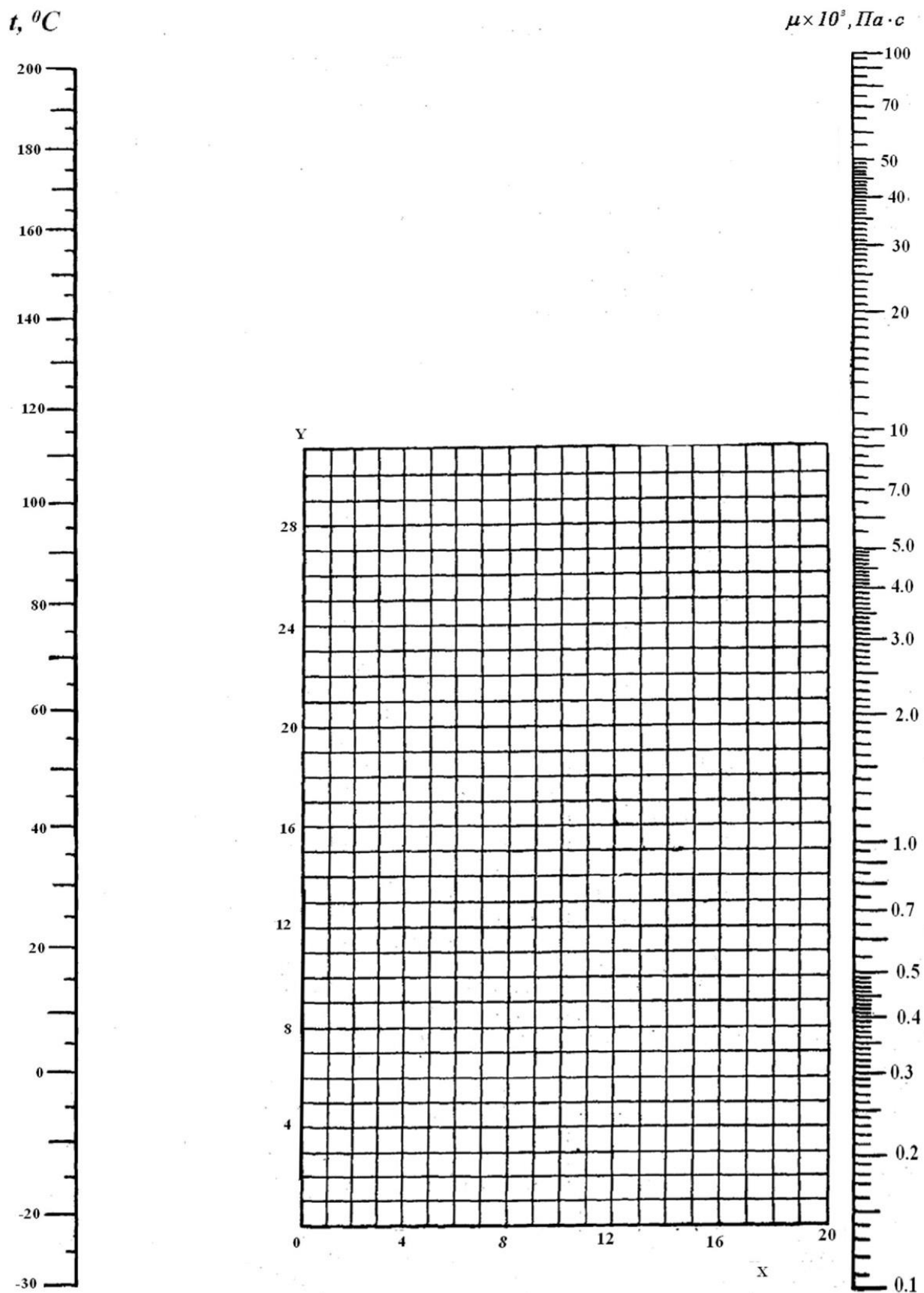


Рис. 2. Номограмма для определения динамического коэффициента вязкости жидкостей.  
Указатель к номограмме в табл. 5

## Указатель к номограмме для определения вязкости жидкостей

Жидкость	x	y	Жидкость	x	y
Амилацетат	11.8	12.5	Нитробензол	10.6	16.2
Амиловый спирт	7.5	18.4	Нитротолуол	11.0	17.0
Аммиак	12.6	2.0	Октан	13.7	10.0
Анилин	8.1	18.7	Октиловый спирт	6.6	21.1
Ацетальдегид	15.2	14.8	Пентан	14.9	5.2
Ацетон	14.5	7.2	Пентахлорэтан	10.9	17.3
Ацетонитрил	14.1	7.4	Пропилацетат	13.1	10.3
Бензол	12.5	10.9	Пропиловый спирт	9.1	16.5
Бутилацетат	12.3	11.0	Пропилформиат	13.1	9.7
Бутиловый спирт	8.6	17.2	Пропионовая кислота	12.8	13.8
Винилацетат	14.0	8.8	Сероуглерод	16.1	7.5
Винилтолуол	13.4	12.0	Тетрахлорэтан	11.9	15.7
Вода	10.2	13.0	Толуол	13.7	10.4
Гексан	14.7	7.0	Уксусная кислота	12.1	14.2
Гептан	14.1	8.4	Уксусный ангидрид	12.7	12.8
Глицерин	2.0	30.0	Фенол	6.9	20.8
Дипропиловый эфир	13.2	8.6	Фреон-11	14.1	9.0
Дифенил	12.0	18.3	Фреон-12	16.8	5.6
Дихлорметан	14.6	8.9	Фреон-21	15.7	7.5
Дихлорэтан	13.2	12.2	Фреон-22	17.2	4.7
Диэтиленгликоль	5.0	24.7	Фреон-113	12.5	11.4
Изобутиловый спирт	7.1	18.0	Фторбензол	13.7	10.4
Изомасляная кислота	12.2	14.4	Хлорбензол	12.3	12.4
Изопропиловый спирт	8.2	16.0	Хлористый метил	15.0	3.8
Керосин	10.2	16.9	Хлористый метилен	14.6	8.9
<i>m</i> -Крезол	2.5	20.8	Хлористый пропил	14.1	7.5
<i>o</i> -Ксилол	13.5	12.1	Хлористый этил	14.8	6.0
<i>m</i> -Ксилол	13.9	10.6	Хлороформ	14.1	10.2
<i>n</i> -Ксилол	13.9	10.9	<i>o</i> -Хлортолуол	13.0	13.3
Масляная кислота	12.1	15.3	<i>m</i> -Хлортолуол	13.3	12.5
Метилацетат	14.2	8.2	<i>n</i> -Хлортолуол	13.3	12.5
Метиловый спирт	12.4	10.5	Циклогексан	9.8	12.9
Метилпропилкетон	14.3	9.5	Циклогексанол	2.9	24.3
Метилпропионат	13.5	9.0	Четырёххлористый углерод	12.7	13.1
Метилформиат	14.2	7.5	Этилацетат	13.7	9.1
Метилэтилкетон	13.9	8.6	Этилбензол	13.2	11.5
Муравьиная кислота	10.7	15.8	Этиленгликоль	6.0	23.6
Нафталин	7.9	18.1	Этиловый спирт	10.5	13.8

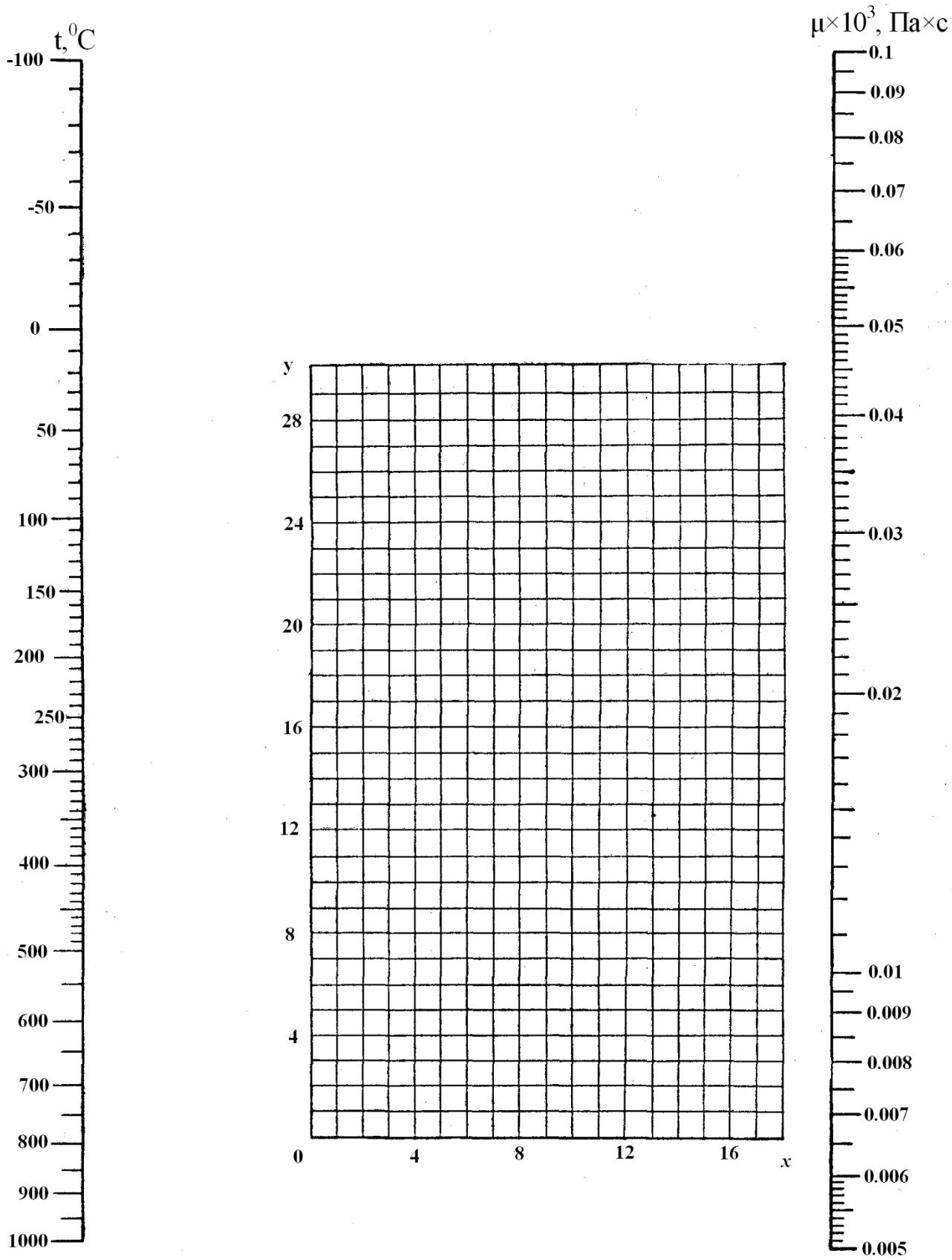


Рис. 3. Номограмма для определения динамического коэффициента вязкости газов. Указатель к номограмме в табл. 6



## Указатель к номограмме для определения вязкости газов

Газ (пар)	x	y	Газ (пар)	x	y
Азот	10,6	20,0	Пропан	9,7	12,9
Аммиак	8,4	16,0	Пропилен	9,0	13,8
Аргон	10,5	22,4	Пропиловый спирт	8,4	13,4
Ацетилен	9,8	14,9	Ртуть	5,3	22,9
Ацетон	9,8	13,0	Сероводород	8,6	18,0
Бензол	8,5	13,2	Толуол	8,6	12,4
Бром	8,9	19,2	2,2,3-триметилбутан	9,5	10,5
Бромистый водород	8,8	20,9	Уксусная кислота	7,7	14,3
Бутан	9,2	13,7	Фреон-11	10,6	15,1
Бутилен	8,9	13,0	Фреон-12	11,1	16,0
Водород	11,2	12,4	Фреон-21	10,8	15,3
Водяной пар	8,0	16,0	Фреон-22	10,1	17,0
Воздух	11,0	20,0	Фреон-113	11,3	14,0
Гексан	8,6	11,8	Фтор	7,3	23,8
Гелий	10,9	20,5	Хлор	9,0	18,4
Диоксид серы	9,6	17,0	Хлористый водород	8,8	18,7
Диоксид углерода	9,5	18,7	Хлористый нитрозил	8,0	17,6
Закись азота	8,8	19,0	Хлористый этил	8,5	15,6
Йод	9,0	18,4	Хлороформ	8,9	15,7
Йодистый водород	9,0	21,3	Циан (дициан)	9,2	15,2
Кислород	11,0	21,3	Цианистый водород	9,8	14,9
Ксенон	9,3	23,0	Циклогексан	9,2	12,0
Метан	9,9	15,5	Этан	9,1	14,5
Метиловый спирт	8,5	15,6	Этилацетат	8,5	13,2
Оксид азота	10,9	20,5	Этилен	9,5	15,1
Оксид углерода	11,0	20,0	Этиловый спирт	9,2	14,2
Пентан	7,0	12,8	Диэтиловый эфир	8,9	13,0

Если требуется найти коэффициент вязкости газовой смеси, то можно воспользоваться эмпирической формулой (4)

$$\frac{M_{\text{см}}}{\mu_{\text{см}}} = \frac{y_1 M_1}{\mu_1} + \frac{y_2 M_2}{\mu_2} + \dots, \quad (4)$$

где  $M_{\text{см}}$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  – мольные массы смеси газов и отдельных компонентов;

$\mu_{\text{см}}$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – динамические коэффициенты вязкости;

$y_1$ ,  $y_2$  – мольные доли компонентов в смеси.

## УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЁМКОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Удельная теплоёмкость – это количество теплоты, которое необходимо подвести к одному килограмму вещества, чтобы нагреть его на один градус. В системе СИ имеет размерность

$$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Для наших расчётов эта величина мелковата. Например, удельная теплоёмкость бензола при 20 °С составляет 1730 Дж/(кг·К). Поэтому мы можем использовать кратную размерность

$$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Тогда удельная теплоёмкость того же бензола будет иметь значение 1,73 Дж/(кг·К). Такое число удобнее для записи. Но в расчётные формулы необходимо подставлять именно размерность в системе СИ.

Джоули и килоджоули – единицы измерения количества энергии довольно новые. До них единицей измерения теплоты была калория или кратная ей килокалория. Калория «тяжелее» джоуля в 4,18 раза. Интересно отметить, что число 4,18 – удельная теплоёмкость воды в кДж/(кг×К) при температурах от 20 °С до 60 °С.

И ещё интересный факт, помогающий запомнить соотношение между джоулем и калорией. Сейчас на упаковках продуктов указывают его энергетическую ценность. И указывают её в двух величинах – кДж и ккал на 100 г продукта. Если разделить первое число на второе, то получится как раз значение удельной теплоёмкости воды 4,18 кДж/(кг×К).

Удельная теплоёмкость зависит от температуры: с её ростом величина удельной теплоёмкости тоже возрастает.

Таблица 7

## Удельная теплоёмкость органических жидкостей при различных температурах, Дж/(кг·К)

№ п/п	Жидкость	Температура, °С											
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	130	150
<b>Пределные углеводороды</b>													
1	Гексан	2009	2081	2153	2225	2296	2368	2440	2512	2583	2727	2799	2942
2	Гептан	1988	2058	2126	2195	2264	2332	2401	2470	2539	2676	2745	2882
3	Октан	1860	1925	1991	2056	2121	2186	2252	2317	2382	2513	2578	2708
4	Пентан	2043	2120	2196	2273	2349	2426	2503	2579	2656	2809	2885	3039
<b>Ароматические углеводороды и их производные</b>													
5	Бензол	1730	1779	1827	1877	1927	1979	2024	2076	2120	2179	2209	2269
6	м-Ксилол	1676	1718	1760	1802	1844	1886	1927	1969	2011	2082	2124	2263
7	Толуол	1705	1751	1796	1843	1890	1936	1982	2026	2070	2120	2145	2195
8	Хлорбензол	1320	1352	1383	1415	1446	1477	1508	1542	1575	1638	1670	1733
<b>Спирты и органические кислоты</b>													
9	Бутиловый спирт	2325	2434	2543	2654	2765	2874	2983	3094	3205	3423	3532	3750
10	Изопропиловый спирт	2661	1810	2958	3107	3256	3403	3549	3696	3842	4136	4283	4577
11	Метиловый спирт	2568	2619	2669	2717	2765	2816	2866	2917	2967	3067	3117	3217
12	Муравьиная кислота	2053	2097	2141	2183	2225	2269	2313	1353	2401	2485	2527	2611
13	Уксусная кислота	1994	2049	2103	2156	2208	2263	2317	2372	2426	2535	2590	2699
14	Этиловый спирт	2485	2600	2715	2841	2967	3095	3222	3369	3515	3809	3956	4250
<b>Эфиры, кетоны, серо- и хлорорганические соединения</b>													
15	Ацетон	2179	2211	2242	2274	2305	2339	2372	2403	2434	2497	2529	2592
16	Дихлор этан	1148	1194	1240	1284	1328	1374	1420	1467	1513	1601	1465	1733
17	Диэтиловый эфир	2267	2338	2409	2531	2652	2772	2891	3011	3130	3365	3483	3719
18	Сероуглерод	997	1006	1014	1021	1027	1033	1039	1048	1056	1068	1074	1086
19	Хлороформ	1022	1037	1052	1067	1081	1096	1110	1125	1140	1169	1184	1213
20	Четырёххлористый углерод	863	878	892	907	922	935	947	962	976	1006	1021	1051
21	Этилацетат	1919	1955	1990	2028	2066	2102	2137	2173	2208	2279	2315	2386

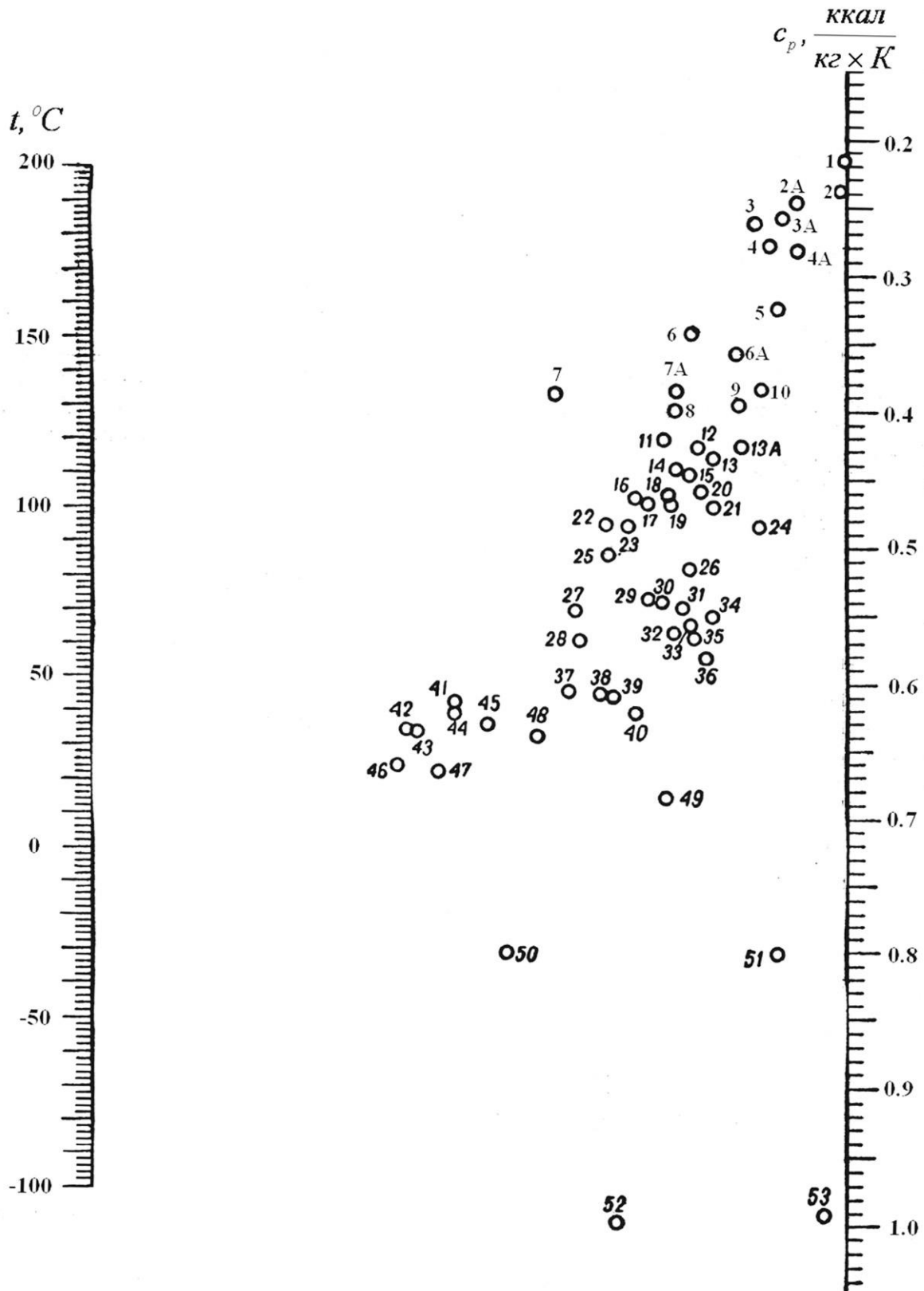


Рис. 4. Номограмма для определения удельной теплоёмкости жидкостей.

Указатель к номограмме в табл. 8.

Перевод в СИ:  $1 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 4,18 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

## Указатель к номограмме для определения теплоёмкости жидкостей

Жидкость	№ точки	Жидкость	№ точки
Амилацетат	26	п-Ксилол	17
Амиловый спирт	37	Метиловый спирт	40
Аммиак	52	Нафталин	14
Анилин	30	Нитробензол	12
Ацетон	32	Нонан	34
Бензиловый спирт	27	Октан	33
Бензол	23	Пиридин	20
Бромистый этил	1	Пропиловый спирт	45
Бутиловый спирт	44	Серная кислота	9
Вода	53	Сероуглерод	2
Гексан	35	Тетрахлорэтилен	3
Гептан	28	Толуол	23
Глицерин	38	Уксусная кислота	29
Даутерм	16	Фреон-11	2А
Диоксид серы	11	Фреон-12	6
Декан	21	Фреон-21	4А
Дифенил	15	Фреон-22	7А
Дифенилметан	22	Фреон-113	3А
Дифениловый эфир	16	Хлорбензол	8
Дихлорметан	5	Хлористый метил	13А
Дихлорэтан	6А	Хлористый этил	13
Изоамиловый спирт	41	Хлороформ	4
Изобутиловый спирт	43	Четырёххлористый углерод	3
Изопропиловый спирт	47	Этилацетат	24
Изопропиловый эфир	31	Этилбензол	25
Иодистый этил	7	Этиленгликоль	39
о-Ксилол	19	Этиловый спирт	42
м-Ксилол	18	Диэтиловый эфир	36

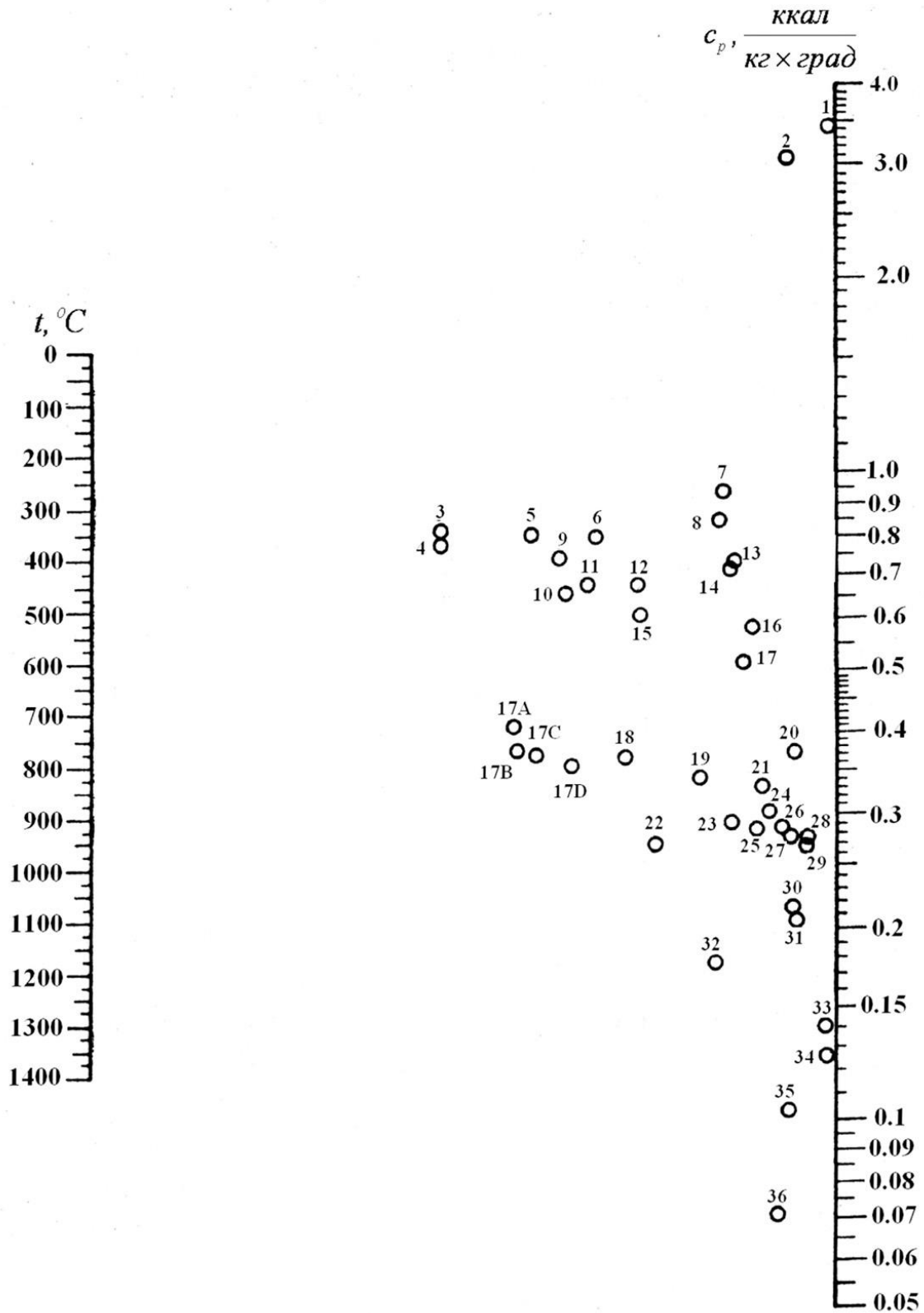


Рис. 5. Номограмма для определения удельной теплоёмкости газов при атмосферном давлении.

Указатель к номограмме в табл. 9.

$$\text{Перевод в СИ: } 1 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \times \text{град}} = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \times \text{К}}$$

## Указатель к номограмме для определения теплоёмкости газов

Газ	Точка	Пределы температуры	Газ	Точка	Пределы температуры
Азот	26	0–1400	Оксид азота	25	0–700
Аммиак	12	0–600		28	700–1400
	14	600–1400	Оксид углерода	26	0–1400
Ацетилен	10	0–200	Сера	33	300–1400
	15	200–400	Сероводород	19	0–700
	16	400–1400	Фреон-11	17B	0–150
Бромистый водород	35	0–1400	Фреон-21	17C	0–150
Водород	1	0–600	Фреон-22	17A	0–150
	2	600–1400	Фреон-113	17D	0–150
Водяной пар	17	0–1400	Фтористый водород	20	0–1400
Воздух	27	0–1400	Хлор	32	0–200
Диоксид серы	22	0–400		34	200–1400
	31	400–1400	Хлористый водород	30	0–1400
Диоксид углерода	18	0–400	Этан	3	0–200
	24	400–1400		9	200–600
Йодистый водород	36	0–1400		8	600–1400
Кислород	23	0–500	Этилен	4	0–200
	29	500–1400		11	200–600
Метан	5	0–300		13	600–1400
	6	300–700			
	7	700–1400			

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Теплопроводность – это способность вещества проводить тепловую энергию от более нагретой к менее нагретой части за счёт хаотического движения молекул.

Если более коротко, то это **способность вещества проводить теплоту.**

Есть вещества, хорошо проводящие теплоту, а есть теплоизоляторы. Нас интересуют и те, и другие.

Для численной характеристики способности вещества проводить теплоту вводится коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , имеющий размерность Вт/(м·К).

В старых системах единиц для измерения коэффициента теплопроводности использовалась размерность ккал/(м×час×град).

Для перевода в систему СИ используется соотношение

$$1 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \times \text{час} \times \text{град}} = 1,163 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Теплопроводность жидкостей можно найти по табл. 10 или номограммам рис. 6 и 7.



## Теплопроводность органических жидкостей при различных температурах, Вт/(м·К)

№	Жидкость	Температура, °С											
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	130	150
<b>ПРЕДЕЛЬНЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ</b>													
1	Гексан	0,137	0,137	0,137	0,137	0,137	0,137	0,137	0,137	0,137	0,137	0,137	0,137
2	Гептан	0,126	0,123	0,120	0,117	0,114	0,111	0,108	0,105	0,102	0,098	0,093	0,087
3	Октан	0,152	0,151	0,150	0,149	0,148	0,147	0,146	0,146	0,145	0,144	0,143	0,141
4	Пентан	0,116	0,114	0,112	0,109	0,107	0,105	0,102	0,100	0,098	0,093	0,091	0,087
<b>АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ И ИХ ПРОИЗВОДНЫЕ</b>													
5	Бензол	0,147	0,144	0,141	0,138	0,136	0,133	0,130	0,128	0,126	0,121	0,118	0,113
6	м-Ксилол	0,133	0,130	0,128	0,128	0,124	0,122	0,120	0,118	0,116	0,113	0,111	0,108
7	Толуол	0,136	0,133	0,131	0,130	0,128	0,125	0,123	0,121	0,119	0,114	0,111	0,106
8	Хлорбензол	0,129	0,127	0,126	0,124	0,121	0,118	0,116	0,114	0,113	0,109	0,107	0,103
<b>СПИРТЫ И ОРГАНИЧЕСКИЕ КИСЛОТЫ</b>													
9	Бутиловый спирт	0,154	0,152	0,150	0,148	0,147	0,145	0,143	0,142	0,140	0,137	0,135	0,132
10	Изопропиловый спирт	0,151	0,150	0,148	0,146	0,144	0,142	0,141	0,139	0,137	0,134	0,132	0,129
11	Метиловый спирт	0,212	0,210	0,208	0,207	0,206	0,204	0,202	0,201	0,200	0,198	0,197	0,195
12	Муравьиная кислота	0,257	0,255	0,253	0,251	0,249	0,247	0,245	0,243	0,241	0,236	0,233	0,228
13	Уксусная кислота	0,173	0,170	0,167	0,165	0,164	0,162	0,160	0,158	0,156	0,151	0,148	0,143
14	Этиловый спирт	0,169	0,168	0,167	0,166	0,165	0,164	0,164	0,163	0,162	0,159	0,157	0,154
<b>ЭФИРЫ, КЕТОНЫ, СЕРО- И ХЛОРСОДЕРЖАЩИЕ СОЕДИНЕНИЯ</b>													
15	Ацетон	0,170	0,168	0,165	0,163	0,160	0,158	0,156	0,153	0,151	0,147	0,145	0,141
16	Дихлорэтан	0,135	0,133	0,130	0,127	0,124	0,122	0,120	0,117	0,114	0,109	0,106	0,101
17	Диэтиловый эфир	0,137	0,136	0,136	0,135	0,135	0,134	0,134	0,133	0,133	0,131	0,130	0,128
18	Сероуглерод	0,165	0,163	0,162	0,158	0,155	0,152	0,150	0,147	0,145	0,141	0,139	0,135
19	Хлороформ	0,132	0,127	0,122	0,117	0,113	0,107	0,102	0,097	0,092	0,083	0,079	0,074
20	Четырёххлористый углерод	0,117	0,114	0,110	0,107	0,104	0,101	0,097	0,094	0,090	0,083	0,080	0,073
21	Этилацетат	0,145	0,142	0,139	0,136	0,133	0,130	0,127	0,123	0,120	0,114	0,111	0,105

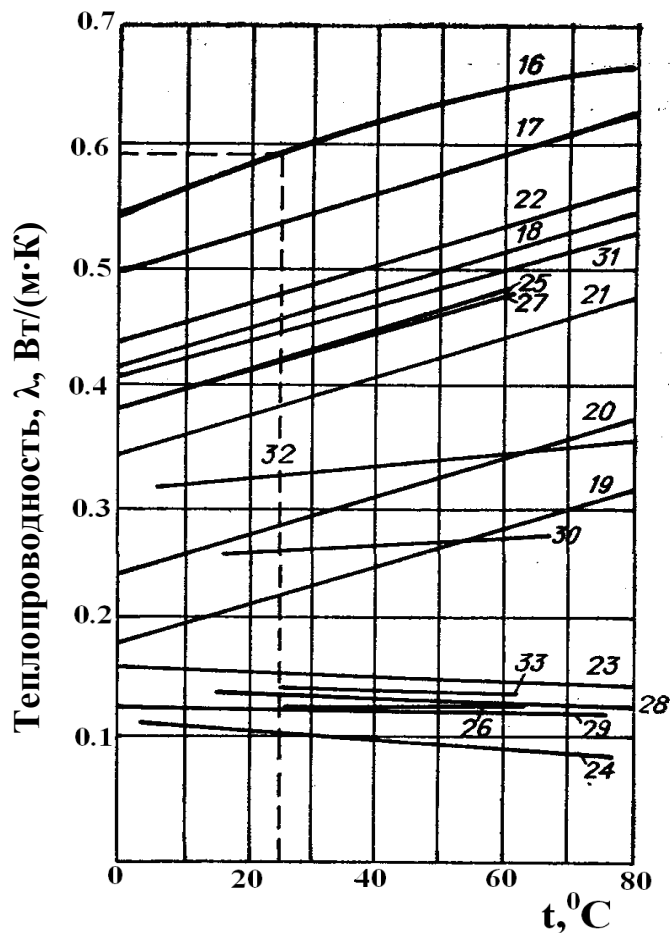
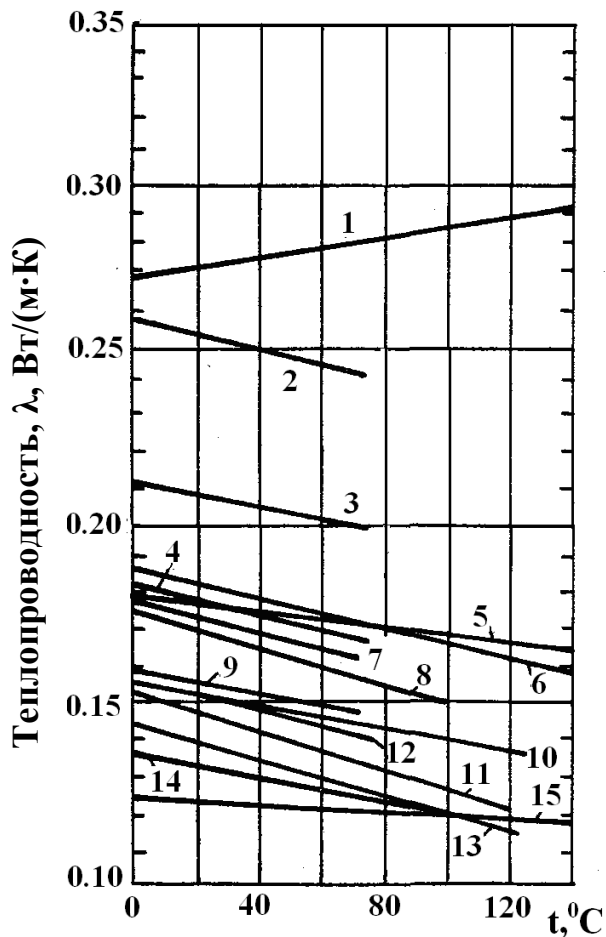


Рис. 6. Номограмма для определения коэффициента теплопроводности жидкостей  
Указатель к номограмме в табл. 11

Таблица 11

Указатель к номограмме рис. 6

Жидкость	№линии	Жидкость	№линии
Аммиак 26 %	31	Муравьиная кислота	2
Анилин	6	Нитробензол	10
Ацетон	8	Октан	33
Бензол	12	Серная кислота 98%	30
Бутиловый спирт	9	Серовуглерод	23
Вазелиновое масло	15	Соляная кислота 30%	27
Вода	16	Толуол	13
Гексан	26	Уксусная кислота	7
Глицерин безводн.	1	Четырёххлористый углерод	24
Глицерин 50 %	25	Этиловый спирт 100 %	4
Изопропанол	11	Этиловый спирт 80 %	19
Касторовое масло	5	Этиловый спирт 60 %	20
Керосин	28	Этиловый спирт 40 %	21
Ксилол	14	Этиловый спирт 20 %	22
Метанол 100 %	3	Диэтиловый эфир	29
Метанол 40 %	32		

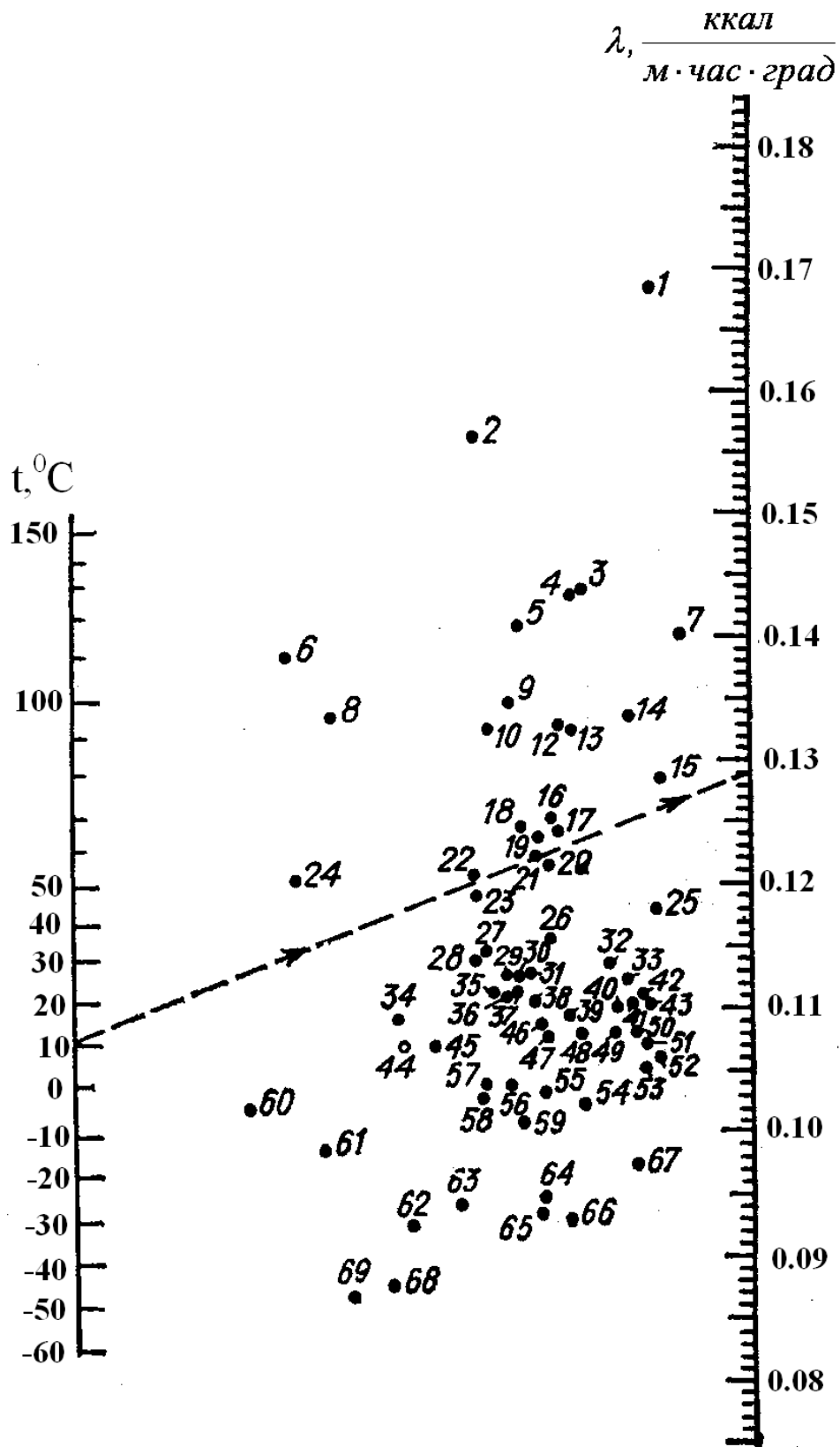


Рис. 7. Номограмма для определения коэффициента теплопроводности жидкостей.

$$\text{Перевод в СИ: } 1 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}} = 1,163 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Указатель к номограмме в табл. 12

## Указатель к номограмме рис. 7

Жидкость	№ точки	Жидкость	№ точки
<i>n</i> -Амиловый спирт	12	Нитрометан	2
<i>изо</i> -Амиловый спирт	15	Нонан	36
Анилин	5	Оливковое масло	7
Ацетон	10	<i>n</i> -Пентан	57
Бензол	23	<i>изо</i> -Пентан	58
Бензин	56	Пропан	30
Бутиловый спирт	16	<i>n</i> -Пропиловый спирт	18
Бромбензол	59	<i>изо</i> -Пропиловый спирт	19
Вазелиновое масло	51	Трихлорэтилен	40
Веретённое масло	33	Триэтиламин	45
Гексиловый спирт	14	Трансформаторное масло	67
Гептиловый спирт	13	Толуол	28
Даутерм (ВОТ)	26	Уксусная кислота	9
Декан	37	Фреон-11	63
Дикумилметан	44	Фреон-12	68
Додекан	31	Фреон-21	34
Диоксид серы	8	Фреон-22	62
Диоксид углерода	60	Фреон-40	24
Изопропилбензол		Фреон-113	69
<i>изо</i> -Октан	65	Хлорбензол	38
Йодбензол	66	Хлористый этилен	49
Керосин	21	Циклогексан	47
Касторовое масло	3	Четырёххлористый углерод	64
<i>о</i> - и <i>м</i> -Ксилол	29	Этан	61
Метиловый спирт	1	Этилбензол	35
Нитробензол	17	Этиловый спирт	4

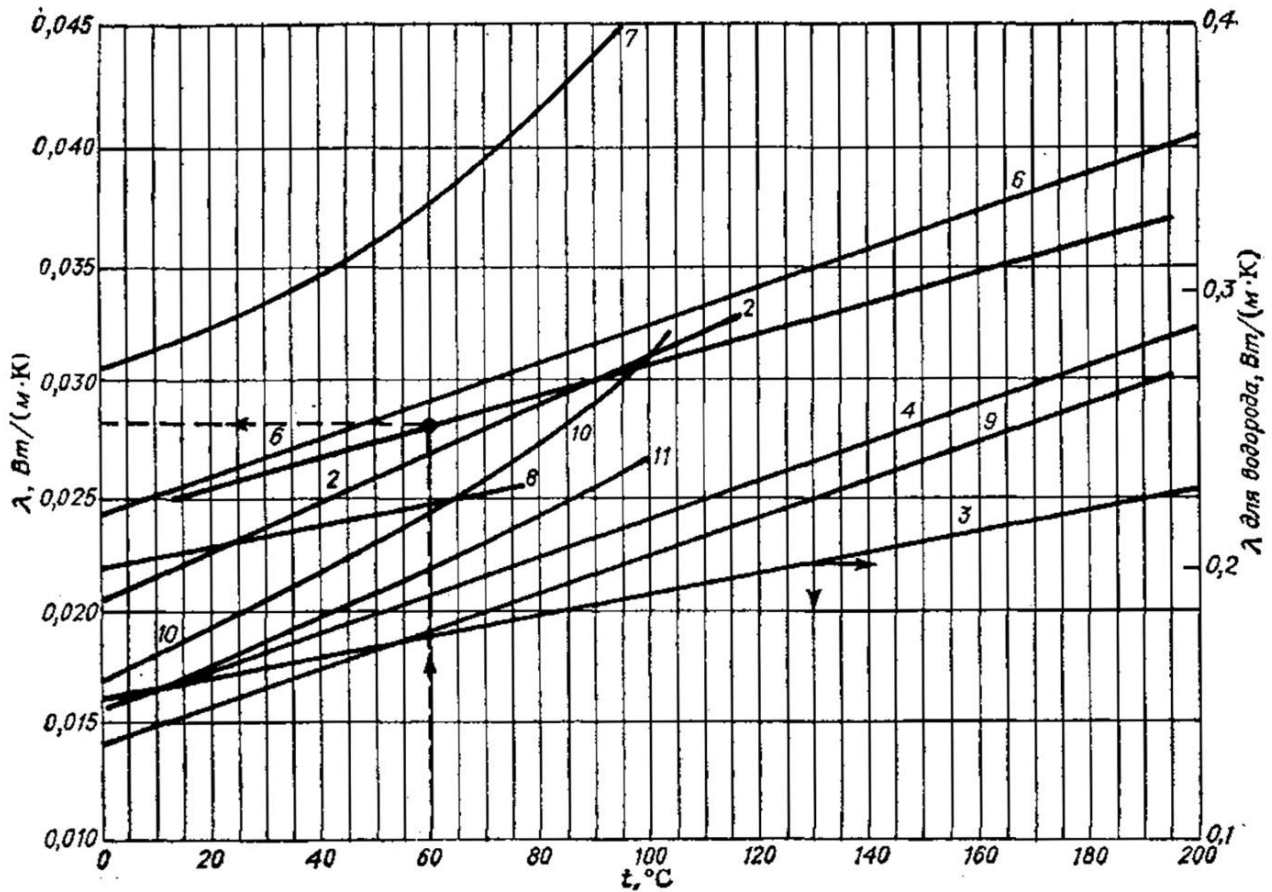


Рис. 8. Номограмма для определения коэффициента теплопроводности газов и паров.  
Указатель к номограмме в табл. 13

Таблица 13

Указатель к номограмме рис. 8

Газ или пар	№ линии	Газ или пар	№ линии
Азот	1	Диоксид углерода	9
Аммиак	2	Кислород	6
Водород (правая шкала)	3	Метан	7
Водяной пар	4	Этан	10
Воздух	2	Этилен	11

## УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПАРООБРАЗОВАНИЯ (КОНДЕНСАЦИИ)

Для того, чтобы жидкость испарялась, переходила в пар, требуется подводить теплоту. А при обратном процессе – **конденсации** – теплота будет выделяться.

Как оценить, сколько нужно теплоты на перевод в пар 1 кг жидкости и сколько теплоты будет выделяться при обратном процессе? Для количественной оценки энергозатрат ввели величину, которая называется удельной теплотой парообразования (конденсации)  $r$ , её размерность в системе СИ – Дж/кг. Так как в этой размерности теплота фазового перехода будет иметь слишком большое значение (например, для этилового спирта при 80 °С эта теплота равна 851000 Дж/кг), в справочной литературе указывается другая единица – кДж/кг.

Удельная теплота парообразования (конденсации) зависит от температуры – чем выше температура, тем меньше эта теплота. Поэтому в расчётах энергозатрат необходимо учитывать температуру процесса.

## Удельная теплота парообразования органических жидкостей при различных температурах, кДж/кг

№	Жидкость	Температура, °С											
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	130	150
<b>ПРЕДЕЛЬНЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ</b>													
1	Гексан	370	363	356	349	342	334	326	318	309	290	280	258
2	Гептан	366	361	355	349	343	336	330	323	316	301	293	276
3	Октан	363	358	353	347	342	336	331	325	319	306	299	285
4	Пентан	371	363	355	346	337	327	317	306	295	270	257	224
<b>АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ И ИХ ПРОИЗВОДНЫЕ</b>													
5	Бензол	436	430	423	416	409	402	395	387	379	363	355	339
6	м-Ксилол	408	403	399	394	388	383	378	372	367	361	349	336
7	Толуол	408	403	398	393	389	384	379	374	369	356	349	336
8	Хлорбензол	370	366	362	358	354	350	347	342	338	330	326	318
<b>СПИРТЫ И ОРГАНИЧЕСКИЕ КИСЛОТЫ</b>													
9	Бутиловый спирт	687	678	670	662	654	645	633	621	612	587	575	550
10	Изопропиловый спирт	750	737	725	712	700	685	670	654	637	603	586	552
11	Метиловый спирт	1173	1159	1144	1127	1110	1085	1060	1041	1014	951	919	856
12	Муравьиная кислота	541	534	526	519	511	503	495	486	478	460	450	430
13	Уксусная кислота	459	452	447	441	435	428	422	415	408	394	386	370
14	Этиловый спирт	913	907	901	891	880	866	851	832	813	763	738	688
<b>ЭФИРЫ, КЕТОНЫ, СЕРО- И ХЛОРСОДЕРЖАЩИЕ СОЕДИНЕНИЯ</b>													
15	Ацетон	553	545	536	528	520	507	494	484	473	448	434	406
16	Дихлорэтан	359	354	349	343	338	332	326	320	314	301	294	279
17	Диэтиловый эфир	367	357	347	336	326	315	304	293	282	257	245	220
18	Сероуглерод	367	362	357	351	344	337	331	324	316	300	292	276
19	Хлороформ	263	259	256	252	248	244	240	236	231	223	219	211
20	Четырёххлористый углерод	214	211	208	204	202	198	194	190	186	177	181	172
21	Этилацетат	411	405	399	393	388	380	372	364	356	338	329	311

## ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ ОРГАНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

**Насыщенный пар – это пар, находящийся в термодинамическом равновесии с жидкостью или твёрдым телом того же состава.**

Давление пара зависит от температуры. Эту зависимость можно представить в виде таблицы. В табл. 15 и 16 приведены величины давления паров некоторых органических жидкостей при различных температурах.

### КОЭФФИЦИЕНТЫ УРАВНЕНИЯ АНТУАНА

Пользоваться таблицами для нахождения давления пара (как и любых других свойств) можно, но не очень удобно. Таблицы трудно ввести в программу расчёта. Часто приходится пользоваться линейной интерполяцией для нахождения промежуточных значений. Гораздо более привлекательным является уравнение, связывающее температуру и давление пара. Таких уравнений предложено несколько. Для инженерных расчётов наибольшей популярностью пользуется уравнение Антуана (5)

$$\ln P = A - \frac{B}{t + 273 + C}, \text{ мм рт. ст.} \quad (5)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  – коэффициенты уравнения Антуана. Для некоторых жидкостей они приведены в табл. 17. В последнем столбце таблицы дан интервал температур, для которого уравнение Антуана даёт надёжные результаты [2].



Давление насыщенного пара некоторых органических жидкостей в зависимости от температуры, мм рт. ст.

№ п/п	Жидкость	Температура, °С											
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	130	150
<b>ПРЕДЕЛЬНЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ</b>													
1	Гексан	120	186	278	403	570	787	1064	1410	1838	2981	3719	5587
2	Гептан	35	58	92	141	209	302	426	587	792	1369	1757	2779
3	Октан	10,4	18,3	30,9	50	78	118	174	250	350	645	853	1422
4	Пентан	422	612	864	1191	1605	2121	2754	3518	4429	6750	8189	11693
<b>АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ И ИХ ПРОИЗВОДНЫЕ</b>													
5	Бензол	74,7	118	181	269	389	547	754	1016	1344	2238	2825	4347
6	м-Ксилол	6,1	11,0	18,8	30,9	49,1	75,4	113	164	232	440	589	1006
7	Толуол	25,5	39,5	64	98	147	204	299	408	571	973	1350	2058
8	Хлорбензол	8,8	15,5	26	42	65,5	97,9	145	208	293	543	719	1211
<b>СПИРТЫ И ОРГАНИЧЕСКИЕ КИСЛОТЫ</b>													
9	Бутиловый спирт	4,4	9,5	18,6	33,7	59,2	112	165	255	386	833	1150	2140
10	Изопропиловый спирт	32,4	59,1	106	177	289	455	692	1021	1460	2790	3800	6906
11	Метиловый спирт	96	160	261	406	625	927	1341	1897	2621	4751	6242	10486
12	Муравьиная кислота	33,1	52,2	82,6	126	190	280	398	552	753	1310	1699	2749
13	Уксусная кислота	11,7	20,6	34,8	56,6	88,9	136	202	294	417	784	1068	1844
14	Этиловый спирт	43,9	78,8	135	222	353	543	813	1187	1692	3223	4320	7601
<b>ЭФИРЫ, КЕТОНЫ, СЕРО- И ХЛОРСОДЕРЖАЮЩИЕ СОЕДИНЕНИЯ</b>													
15	Ацетон	185	283	422	613	861	1190	1611	2142	2797	4547	5670	8558
16	Дихлорэтан	60,5	97,7	152	229	338	480	664	906	1220	2050	2580	4122
17	Диэтиловый эфир	437	641	914	1271	1728	2301	3009	3870	4901	7550	9205	13260

## Давление насыщенного пара некоторых органических жидкостей в зависимости от температуры, мм рт. ст.

Жидкость	Температура, °С													
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Анилин	-	-	-	1,0	2,5	5,6	10,6	18,1	29,4	45,9	69,3	101,4	144,3	199,6
Ацетон	116,4	184,9	283,6	421,7	610,1	861,0	1188,1	1611,1	2142,0	2797,0	3593,6	4547,6	5669,7	6963,4
Бензол	45,6	75,2	119,4	182,8	271,3	391,5	550,8	757,7	1021,1	1350,7	1756,9	2250,4	2841,6	3543,1
Бромбензол	-	-	5,7	10,0	17,0	27,6	43,6	66,1	97,7	141,1	198,7	274,9	372,6	495,8
Бутанол	1,8	4,5	10,7	18,6	33,1	59,0	100,6	163,6	255,6	387,0	572,0	830,7	1150,2	1518,9
Гексан	75,7	121,2	187,1	279,4	405,3	572,8	790,6	1068,3	1416,2	1845,1	2366,0	2990,6	3730,8	4597,2
Гептан	20,6	35,4	58,4	92,5	141,6	210,2	303,6	427,8	589,4	795,7	1055,0	1375,2	1765,5	2235,2
Дихлорэтан	40,4	66,6	105,8	164,4	241,7	349,9	494,3	683,0	924,7	1229,1	1606,7	2068,5	2625,7	3290,4
Изопропанол	17,0	32,4	59,2	105,3	177,1	288,2	454,8	691,8	1020,7	1456,4	2036,8	2797,8	3778,6	5016,8
о-Ксилол	2,6	4,9	8,9	15,3	25,5	40,8	63,2	95,0	139,0	198,5	277,3	379,8	510,7	675,2
п-Ксилол	-	6,5	11,6	19,8	32,5	51,4	78,7	117,2	169,8	240,4	333,2	452,8	604,6	794,2
Метанол	55,7	97,4	163,5	264,7	414,8	631,1	934,8	1351,0	1909,4	2643,6	3592,6	4790,7	6282,6	8125,9
Метилацетат	104,7	170,0	265,6	401,1	587,7	837,8	1165,4	1586,0	2116,5	2775,5	3582,6	4558,6	5724,3	7099,7
Муравьиная к-та	19,3	32,7	53,3	82,5	125,8	189,8	279,7	397,0	552,0	747,5	957,0	-	-	-
Нитробензол	-	-	0,4	0,6	1,0	2,0	4,2	7,5	12,9	20,9	32,3	48,0	69,7	100,4
Октан	5,6	10,5	18,5	31,1	50,4	78,7	119,0	175,0	250,8	351,2	481,5	647,6	855,9	1113,3
Пропанол	7,4	14,4	27,6	50,2	87,3	146,8	239,1	376,5	572,8	843,6	1206,3	1681,6	2294,3	3073,5
Сероуглерод	197,6	297,5	434,6	618,0	857,7	1164,9	1551,3	2028,7	2631,5	3367,0	4234,1	5244,2	6441,0	7933,7
Тетрахлорметан	56,7	91,6	142,5	214,4	313,3	445,9	619,8	843,2	1125,2	1475,2	1903,3	2420,0	3035,9	3762,1

Жидкость	Температура, °С													
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Толуол	12,4	21,8	36,7	59,2	92,1	139,0	203,8	291,2	406,7	556,3	746,6	984,8	1278,5	1635,5
Уксусная кислота	–	11,7	20,6	34,8	56,6	88,9	136,9	202,3	293,7	417,1	580,8	794,0	1067,6	1414,2
Хлорбензол	4,9	8,8	15,5	26,0	42,0	65,5	97,9	144,8	208,4	292,8	402,6	542,8	719,0	939,4
Хлороформ	98,7	157,0	241,0	358,6	518,7	731,6	1008,6	1362,1	1805,2	2351,9	3017,0	3815,5	4763,2	5876,1
Циклогексан	47,5	77,5	121,7	184,7	271,8	389,2	543,8	743,3	995,8	1310,1	1695,6	2161,4	2717,8	3374,4
Этанол	23,6	43,9	79,2	135,3	222,2	352,7	543,6	809,7	1170,4	1651,5	2280,2	3087,5	4107,9	5380,2
Этилацетат	42,7	72,8	118,7	186,2	282,2	415,4	596,3	833,9	1138,9	1523,9	2002,1	2587,0	3293,3	4136,5
Этилбензол	3,8	7,1	12,6	21,5	35,2	55,5	84,8	125,8	181,9	257,0	355,3	481,7	641,7	841,1
Этиловый эфир	290,8	439,8	648,3	921,1	1275,9	1733,4	2302,7	2973,2	3829,8	4853,6	6080,8	7508,1	9158,3	-

**Значения коэффициентов уравнения Антуана  
для расчёта давления пара некоторых жидкостей, мм рт. ст.**

№ п/п	Жидкость	А	В	С	Интервал темпера- тур, °С
<b>ПРЕДЕЛЬНЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ</b>					
1	Гексан	15,8366	2697,55	-48,78	-28÷+97
2	Гептан	15,8737	2911,32	-56,51	-3÷+127
3	Октан	15,9426	3120,29	-63,63	+19÷+152
4	Пентан	15,8333	2477,07	-39,94	-53÷+47
<b>АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ И ИХ ПРОИЗВОДНЫЕ</b>					
5	Бензол	15,9008	2788,51	-52,36	+7÷+104
6	м-Ксилол	16,1330	3366,99	-58,04	+27÷+167
7	Толуол	16,0137	3096,52	-53,67	+7÷+137
8	Хлорбензол	16,0676	3295,12	-55,60	+47÷+147
<b>СПИРТЫ И ОРГАНИЧЕСКИЕ КИСЛОТЫ</b>					
9	Бутиловый спирт	17,2160	3137,02	-94,43	+15÷+131
10	Изопропанол	18,6929	3640,20	-53,54	0÷+101
11	Метиловый спирт	18,5875	3626,55	-34,29	-16÷+91
12	Муравьиная кислота	16,9882	3599,58	-26,09	-2÷+136
13	Уксусная кислота	16,8080	3405,57	-56,34	+17÷+157
14	Этиловый спирт	18,9119	3803,98	-41,68	-3÷+96
<b>ЭФИРЫ, КЕТОНЫ, СЕРО- И ХЛОРСОДЕРЖАЩИЕ СОЕДИНЕНИЯ</b>					
15	Ацетон	16,6513	2940,46	-35,93	-32÷+77
16	Дихлорэтан	16,1764	2927,17	-50,22	-33÷+100
17	Диэтиловый эфир	16,0828	2511,29	-41,94	-48÷+67
18	Сероуглерод	15,9844	2690,85	-31,62	-45÷+69
19	Хлороформ	15,9732	2696,79	-46,16	-13÷+97
20	Четырёххлористый углерод	15,8742	2808,19	-45,99	-20÷+101
21	Этилацетат	16,1516	2790,50	-57,15	-4÷+112

## СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

Вода и водяной пар очень широко применяются в химической технологии в качестве хладагента и теплоносителя. Ниже, в табл. 18 и 19, приведены основные свойства воды и её пара.

*Таблица 18*

**Свойства воды в зависимости от температуры  
(на линии насыщения)**

Температура, °С	Плотность, $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Теплоёмкость, $c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \times \text{К}}$	Вязкость, $\mu \times 10^3,$ Па × с	Теплопроводность, $\lambda \times 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$	Критерий Прандтля, Pr
10	1000	4,19	1,310	57,5	9.52
15	999	4,19	1,155	58,7	8.24
20	998	4,18	1,000	59,9	7.02
25	997	4,18	0,902	60,9	6.19
30	996	4,18	0,804	61,8	5.42
35	994	4,18	0,731	62,6	4.88
40	992	4,18	0,657	63,4	4.31
50	988	4,18	0,549	64,8	3.54
60	983	4,18	0,470	65,9	2.98
70	978	4,19	0,406	66,8	2.55
80	972	4,19	0,355	67,5	2.21
90	965	4,19	0,315	68,0	1.95
100	958	4,23	0,282	68,3	1.75
110	951	4,23	0,256	68,5	1.58
120	943	4,23	0,231	68,6	1.45
130	935	4,27	0,212	68,6	1.32
140	926	4,27	0,196	68,5	1.23
150	917	4,32	0,185	68,4	1.17

**Свойства насыщенного водяного пара в зависимости  
от давления и температуры**

Температура, °С	Давление абсолютное, МПа (кг/см <sup>2</sup> )	Плотность, $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Вязкость, $\mu \times 10^3,$ Па × с	Теплота конденсации, $r, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
<b>В зависимости от давления</b>				
104,2	<b>0,1177 (1,2)</b>	0,687	0,0125	2249
108,7	<b>0,1373 (1,4)</b>	0,793	0,0127	2237
112,7	<b>0,1570 (1,6)</b>	0,898	0,0128	2227
116,3	<b>0,1766 (1,8)</b>	1,003	0,0130	2217
119,6	<b>0,1962 (2,0)</b>	1,107	0,0131	2208
132,9	<b>0,2943 (3,0)</b>	1,618	0,0136	2171
142,9	<b>0,3924 (4,0)</b>	2,120	0,0140	2141
151,1	<b>0,4905 (5,0)</b>	2,614	0,0143	2117
158,1	<b>0,5886 (6,0)</b>	3,104	0,0146	2095
164,2	<b>0,6867 (7,0)</b>	3,591	0,0149	2075
169,6	<b>0,7848 (8,0)</b>	4,075	0,0151	2057
174,5	<b>0,8829(9,0)</b>	4,536	0,0153	2040
179,0	<b>0,981 (10)</b>	5,037	0,0156	2024
183,2	<b>1,079 (11)</b>	5,516	0,0159	2009
187,1	<b>1,177 (12)</b>	5,996	0,0163	1995
<b>В зависимости от температуры</b>				
<b>100</b>	0,1013	0,597	0,0123	2260
<b>105</b>	0,1209	0,704	0,0125	2248
<b>110</b>	0,1433	0,825	0,0127	2234
<b>115</b>	0,1691	0,964	0,0129	2221
<b>120</b>	0,1987	1,120	0,0131	2207
<b>125</b>	0,2322	1,296	0,0133	2194
<b>130</b>	0,2703	1,494	0,0135	2179
<b>135</b>	0,3131	1,715	0,0137	2165
<b>140</b>	0,3615	1,962	0,0139	2150
<b>145</b>	0,4158	2,238	0,0141	2125
<b>150</b>	0,4763	2,543	0,0143	2120
<b>160</b>	0,6183	3,252	0,0147	2089
<b>170</b>	0,7927	4,113	0,0151	2056

## ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ $\lambda$ ОТ КРИТЕРИЯ РЕЙНОЛЬДСА

Для ламинарного (упорядоченного) режима движения коэффициент трения  $\lambda$  не зависит от состояния стенки трубы и находится по формуле Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (6)$$

Для турбулентного режима движения расчёт усложняется. Для гладких труб расчёт проводится по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (7)$$

Для шероховатых труб вводится величина относительной шероховатости  $\varepsilon$ , которая равна отношению абсолютной высоте выступов  $e$  к внутреннему диаметру трубы

$$\varepsilon = \frac{e}{d}. \quad (8)$$

Для стальных труб с незначительной коррозией абсолютную шероховатость считают равной 0,2 мм. Для старых ржавых труб 0,67 мм и выше. Для других случаев значения абсолютной шероховатости приведены в [1, с. 519].

Расчёт коэффициента трения  $\lambda$  проводится по формуле

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[ \frac{\varepsilon}{3,7} + \left( \frac{6,81}{\text{Re}} \right)^{0,9} \right]. \quad (9)$$

Для нахождения коэффициента трения в шероховатых трубах можно применять номограмму (рис. 9).

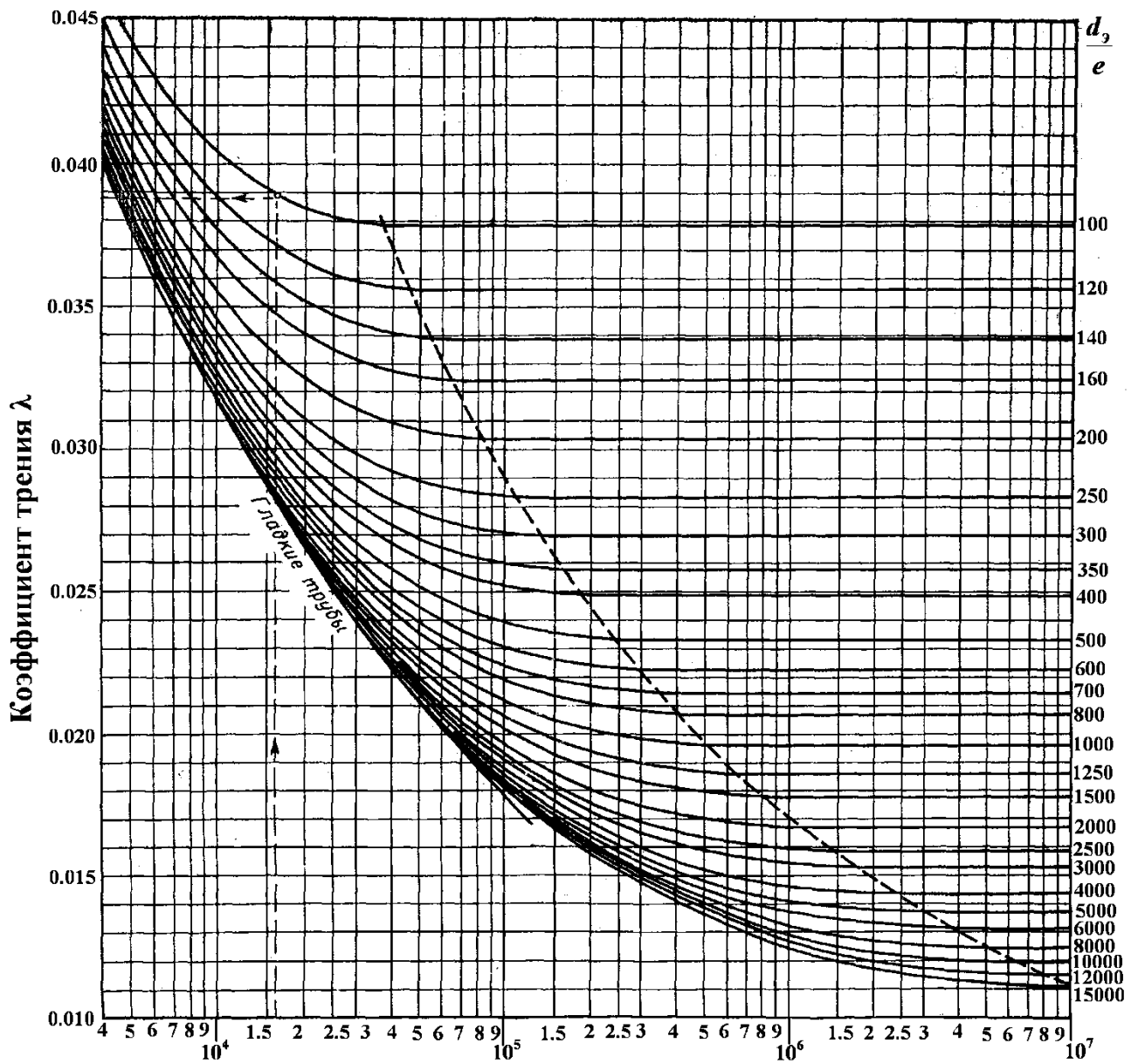


Рис. 9. Зависимость коэффициента трения  $\lambda$  от критерия Рейнольдса и степени шероховатости  $d_s/e$



## ОРИЕНТИРОВОЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

При расчёте теплообменника на этапе подбора аппарата по его площади поверхности теплопередачи необходимо знать, а какие примерно значения может принимать коэффициент теплопередачи. Его величина зависит от того, какой поток отдаёт теплоту и какой получает, что при этом с веществом потока происходит. В табл. 20 приведены рекомендуемые для ориентировочных расчётов величины коэффициента теплопередачи  $K$ , которые были получены в результате обобщения опыта работы большого числа теплообменников.

*Таблица 20*

### Ориентировочные значения коэффициента теплопередачи $K$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К)

Вид передачи теплоты	Вынужденное движение	Свободное движение
От газа к газу (при невысоких давлениях)	10–40	4–12
От жидкости к газу (газовые холодильники)	10–60	4–20
От конденсирующегося пара к газу (воздухоподогреватели)	10–60	4–12
От жидкости к жидкости (вода)	800–1700	140–340
От жидкости к жидкости (углеводороды)	120–270	30–60
От конденсирующегося пара к воде (конденсаторы, подогреватели)	800–3500	300–1200
От конденсирующегося пара к органическим жидкостям (подогреватели)	120–340	60–170
От конденсирующегося пара органических веществ к воде (конденсаторы)	300–800	230–460
От конденсирующегося пара к кипящей жидкости (испарители, кипятивники)	Не бывает	300–2500

## СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ПРОВОДИМОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ СТЕНКИ

В процессе эксплуатации теплообменника его поверхность покрывается загрязнениями. Это очень плохо: загрязнения существенно снижают эффективность работы аппарата. Поэтому ещё на стадии проектирования необходимо предусмотреть возможность появления этих загрязнений  $r_1$  и  $r_2$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2} + r_1 + r_2}, \quad (10)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи для горячего (1) и холодного (2) потоков Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\delta_{ст}$  – толщина теплопередающей стенки, м, для кожухотрубчатых теплообменников в большинстве случаев равен 0,002 м;

$\lambda_{ст}$  – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К), для обычных сталей имеет значение 46 Вт/(м·К), для легированных (нержавеющих) 17,5 Вт/(м·К);

$r_1$  и  $r_2$  – термические сопротивления загрязнений стенки со стороны горячего (1) и холодного (2) потоков, (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

Величины термического сопротивления имеют очень небольшие значения. Например, для чистых нефтепродуктов термическое сопротивление равно 0,00034 (м<sup>2</sup>·К)/Вт. Пользоваться таким числом неудобно. Поэтому для удобства в практических расчётах предпочитают пользоваться не величиной термического сопротивления  $r$ , а её обратной – **тепловой проводимостью загрязнений стенки** – аналогом коэффициента теплоотдачи. Значения этой величины для различных теплоносителей приведены в табл. 21.

### Пример

Коэффициент теплоотдачи от горячего потока (бензол) равен

$$\alpha_1 = 1200 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к холодному потоку (вода среднего качества) равен

$$\alpha_2 = 1700 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Толщина стенки трубы 2 мм, коэффициент теплопроводности стали 46 Вт/(м·К).

### Вычисление коэффициента теплопередачи

По табл. 21 принимаем тепловую проводимость загрязнений стенки:

со стороны бензола 5800 Вт/(м<sup>2</sup>·К),

со стороны воды 2500 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

По формуле (10) находим значение коэффициента теплопередачи  $K$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2} + r_1 + r_2} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{1200} + \frac{0,002}{46} + \frac{1}{1700} + \frac{1}{5800} + \frac{1}{2500}} = 491 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Таблица 21

### Среднее значение тепловой проводимости загрязнений стенки

Теплоносители		Тепловая проводимость загрязнений
Вода	загрязнённая	1400–1860
	среднего качества	1860–2900
	хорошего качества	2900–5800
	очищенная	2900–5800
	дистиллированная	11600
Нефтепродукты чистые, масла, пары хладагентов		2900
Нефтепродукты сырые		1160
Органические жидкости, рассолы, жидкие хладагенты		5800
Водяной пар (с содержанием масла)		5800
Органические пары		11600
Воздух		2800

## ДИАМЕТРЫ УСЛОВНОГО ПРОХОДА ШТУЦЕРОВ КОЖУХОТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Таблица 22

Диаметр кожуха D, мм	Диаметр условного прохода штуцеров (мм) для трубного пространства при числе ходов по трубам				Диаметр условного прохода штуцеров (мм) для межтрубного пространства
	1	2	4	6	
159	80	-	-	-	80
273	100	-	-	-	100
325	150	100	-	-	100
400	150	150	-	-	150
600	200	200	150	100	200
800	250	250	200	150	250
1000	300	300	200	150	300
1200	350	350	250	200	350
1400	-	350	250	200	350

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ТН И ТКИ ХОЛОДИЛЬНИКОВ ХН<sup>3</sup> И ХК<sup>4</sup> С ТРУБАМИ 25×2 мм И 20×2 мм

При проектировании теплообменного аппарата появляется задача выбора теплообменника. Основным параметром при этом будет величина площади поверхности теплопередачи  $F$  и число трубок на один ход  $n$ . В табл. 23 и 24 приведены основные характеристики теплообменников с трубами диаметром 25×2 и 20×2 мм по ГОСТ 31842-2012 «Нефтяная и газовая промышленность. Теплообменники кожухотрубчатые. Технические требования». Число трубок на один ход находится как частное от деления общего числа трубок в аппарате  $n_{об}$  на число ходов.

<sup>3</sup> Жёсткого типа

<sup>4</sup> С температурным компенсатором

**ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ТН И ТКИ  
ХОЛОДИЛЬНИКОВ ХН И ХК С ТРУБАМИ 25×2 мм**

Таблица 23

Диаметр кожуха внутренний $D$ , мм	Общее число труб, $n_{об}$ , шт.	Длина труб $L$ , м						Проходное сечение, $m^2$		$n_p$	Масса, кг, не более
		1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	9.0	$S_T \cdot 10^2$	$S_{в.п.} \cdot 10^2$		
		Поверхность теплообмена, $F_m, m^2$									
<b>О д н о х о д о в ы е</b>											
159*	13	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	-	-	-	0.5	0.4	5	192/211/255
273*	37	<b>4,5</b>	<b>6,0</b>	<b>9,0</b>	-	-	-	1.3	0.9	7	465/527/649
325*	62	<b>7,5</b>	<b>10,0</b>	<b>14,5</b>	<b>19,5</b>	-	-	2.1	1.3	9	485/540/680/820
400	111	-	<b>17</b>	<b>26</b>	<b>35</b>	<b>52</b>	-	3.8	2.0	11	780/1035/1290/1750
600	257	-	<b>40</b>	<b>61</b>	<b>81</b>	<b>121</b>	-	8.9	4.0	17	1350/1810/2410/3150
800	465	-	<b>73</b>	<b>109</b>	<b>146</b>	<b>219</b>	<b>329</b>	16.1	6.9	23	2280/3130/3720/5360
1000	747	-		<b>179</b>	<b>235</b>	<b>352</b>	<b>528</b>	25.6	10.6	29	4500/5600/7850/11200
1200	1083	-			<b>340</b>	<b>510</b>	<b>765</b>	37.5	16.4	35	8000/11250/16000
<b>Д в у х х о д о в ы е</b>											
325*	56	<b>6,5</b>	<b>9,0</b>	<b>13,0</b>	<b>17,5</b>	-	-	1.0	1.3	8	485/550/690/820
400	100	-	<b>16,0</b>	<b>24,0</b>	<b>31,0</b>	<b>47</b>	-	1.7	2.0	10	820/1040/1260/1600
600	240	-	<b>38</b>	<b>57</b>	<b>75</b>	<b>113</b>	-	4.2	4.0	16	1480/1890/2290/3130
800	442	-	<b>69</b>	<b>104</b>	<b>139</b>	<b>208</b>	<b>312</b>	7.7	6.5	22	2520/3230/3950/5360/7480
1000	718	-	-	<b>169</b>	<b>226</b>	<b>338</b>	<b>507</b>	12.4	10.6	28	4850/6100/8166/11400
1200	1048	-	-	-	<b>329</b>	<b>494</b>	<b>740</b>	17.9	16.4	34	8700/11860/16550

Диаметр кожуха внутренний $D$ , мм	Общее число труб, $n_{об}$ , шт.	Длина труб $L$ , м						Проходное сечение, $m^2$		$n_p$	Масса, кг, не более
		1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	9.0	$S_T \cdot 10^2$	$S_{в.п.} \cdot 10^2$		
		Поверхность теплообмена, $F_m, m^2$									
<b>Ч е т ы р ё х х о д о в ы е</b>											
600	206	-	32	49	65	97	-	1.8	4.0	14	1480/1890/2290/3130
800	404	-	63	95	127	190	285	3.0	6.5	20	2520/3230/3950/5360/7480
1000	666	-	-	157	209	314	471	5.5	10.6	26	4850/6100/8166/11400
1200	986	-	-	-	310	464	697	8.4	16.4	32	8700/11860/16550
<b>Ш е с т и х о д о в ы е</b>											
600	196	-	312	46	61	91	-	1.1	3.7	14	1480/1890/2290/3130
800	384	-	60	90	121	181	271	2.2	7.0	20	2520/3230/3950/5360/7480
1000	642	-	-	151	202	302	454	3.6	10.2	26	4850/6100/8166/11400
1200	958	-	-	-	301	451	677	5.2	14.2	32	8700/11860/16550

\*– наружный диаметр кожуха

$n_p$  – число рядов труб по вертикали для горизонтальных аппаратов

**ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ТН И ТКИ  
ХОЛОДИЛЬНИКОВ ХН И ХК С ТРУБАМИ 20×2 мм**

Таблица 24

Диаметр кожуха внутренний $D$ , мм	Общее число труб, $n_{об}$ , шт.	Длина труб $L$ , м						Проходное сечение, $м^2$		$n_p$	Масса, кг, не более
		1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	9.0	$S_T \cdot 10^2$	$S_{в.п.} \cdot 10^2$		
		Поверхность теплообмена, $F_m, м^2$									
<b>О д н о х о д о в ы е</b>											
159*	19	<b>2.0</b>	<b>3.5</b>	-	-	-	-	0.4	0.3	5	196/217/263
273*	61	<b>6.0</b>	<b>7.5</b>	<b>11.5</b>	-	-	-	1.2	0.7	7	388/455/590
325*	100	<b>9.5</b>	<b>12.5</b>	<b>19.0</b>	<b>25.0</b>	-	-	2.0	1.1	9	495/575/735/895
400	181	-	<b>23.0</b>	<b>34.0</b>	<b>46.0</b>	<b>68.0</b>	-	3.6	1.7	11	860/1130/1430/1850
600	389	-	<b>49</b>	<b>73</b>	<b>98</b>	<b>147</b>	-	7.8	4.1	17	1570/1980/3450
800	717	-	<b>90</b>	<b>135</b>	<b>180</b>	<b>270</b>	<b>405</b>	14.4	6.9	23	2560/3520/4150/5800/8400
1000	1173	-	-	<b>221</b>	<b>295</b>	<b>442</b>	<b>663</b>	23.6	10.1	29	5000/6250/9030/12800
1200	1701	-	-	-	<b>427</b>	<b>641</b>	<b>961</b>	34.2	14.5	35	9000/12800/18400
<b>Д в у х х о д о в ы е</b>											
325*	90	<b>8.5</b>	<b>11.0</b>	<b>17.0</b>	<b>22.5</b>	-	-	0.9	1.1	8	510/575/740/890
400	166	-	<b>21.0</b>	<b>31.0</b>	<b>42.0</b>	<b>63.0</b>	-	1.7	1.7	10	870/1090/1370/1890
600	370	-	<b>47</b>	<b>70</b>	<b>93</b>	<b>139</b>	-	3.7	4.1	16	1650/2100/3500/3380
800	690	-	<b>87</b>	<b>130</b>	<b>173</b>	<b>260</b>	<b>390</b>	6.9	6.9	22	2750/3550/4350/5950/8500
1000	1138	-	-	<b>214</b>	<b>286</b>	<b>429</b>	<b>643</b>	11.4	10.1	28	5450/6750/9250/12850
1200	1658	-	-	-	<b>417</b>	<b>625</b>	<b>937</b>	16.5	14.5	34	9750/13400/18900

Диаметр кожуха внутренний $D$ , мм	Общее число труб, $n_{об}$ , шт.	Длина труб $L$ , м						Проходное сечение, $m^2$		$n_p$	Масса, кг, не более
		1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	9.0	$S_T \cdot 10^2$	$S_{в.п.} \cdot 10^2$		
		Поверхность теплообмена, $F_m, m^2$									
<b>Ч е т ы р ё х х о д о в ы е</b>											
600	334	-	<b>42</b>	<b>63</b>	<b>84</b>	<b>126</b>	-	1.6	4.1	14	1650/2100/3500/3380
800	638	-	<b>80</b>	<b>120</b>	<b>160</b>	<b>240</b>	<b>361</b>	3.0	6.9	20	2750/3550/4350/5950/8500
1000	1072	-	-	<b>202</b>	<b>269</b>	<b>404</b>	<b>606</b>	5.1	10.1	26	5450/6750/9250/12850
1200	1580	-	-	-	<b>397</b>	<b>595</b>	<b>893</b>	7.9	14.5	32	9750/13400/18900
<b>Ш е с т и х о д о в ы е</b>											
600	316	-	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>79</b>	<b>119</b>	-	0.9	3.7	14	1650/2100/3500/3380
800	618	-	<b>78</b>	<b>116</b>	<b>155</b>	<b>233</b>	<b>349</b>	2.0	6.5	20	2750/3550/4350/5950/8500
1000	1044	-	-	<b>197</b>	<b>262</b>	<b>393</b>	<b>590</b>	3.4	9.6	26	5450/6750/9250/12850
1200	1544	-	-	-	<b>388</b>	<b>582</b>	<b>873</b>	4.9	13.1	32	9750/13400/18900

\*- наружный диаметр кожуха

 $n_p$  – число рядов труб по вертикали для горизонтальных аппаратов



## **ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЖУХОТРУБЧАТЫХ КОНДЕНСАТОРОВ КН И КК И ИСПАРИТЕЛЕЙ ИН И ИК С ТРУБАМИ ДИАМЕТРОМ 25×2 мм**

**Конденсаторы** кожухотрубчатые КН (жёсткого типа) и КК (с температурным компенсатором на кожухе) относятся к аппаратам, в которых происходит изменение агрегатного состояния. При этом пар органического вещества переходит в жидкую фазу, а выделяющаяся теплота конденсации снимается хладагентом, например, водой.

Кожухотрубные конденсаторы представляют собой горизонтальный или вертикальный теплообменный аппарат диаметром от 600 до 1400 мм со штуцерами для входа пара, выхода конденсата, ввода и вывода хладагента (воды) и вывода несконденсировавшегося пара. Выбор горизонтального кожухотрубного конденсатора КНГ и ККГ или вертикального КНВ и ККВ зависит от технических требований к эксплуатации на объекте (табл. 25).

**Испарители** кожухотрубчатые предназначены для перевода в пар органических жидкостей. ИН – с неподвижными трубными решётками, ИК – с температурным компенсатором. Теплоносителем в них как правило является насыщенный водяной пар.

Все испарители делятся на одноходовые вертикальные термосифонные, параметры которых приведены в табл. 25, и испарители (кипятильники) с паровым пространством, параметры которых приведены в табл. 26.

**ПАРАМЕТРЫ  
КОЖУХОТРУБЧАТЫХ КОНДЕНСАТОРОВ КН И ККИ  
ИСПАРИТЕЛЕЙ ИН И ИК С ТРУБАМИ 25×2 мм**

*Таблица 25*

Диаметр кожуха внутренний <i>D</i> , мм	Общее число труб, <i>n</i> <sub>об</sub> , шт.	Д л и н а т р у б , м			
		2	3	4	6
<b>Одноходовые, испарители ИН и ИК</b>					
600	261	40	61	81	-
800	473	74	112	150	-
1000	783	121	182	244	-
1200	1125	-	260	348	-
1400	1549	-	358	480	-
<b>Конденсаторы КН и КК</b>					
<b>Д в у х х о д о в ы е</b>					
600	244	-	57	76	114
800	450	-	106	142	212
1000	754	-	175	234	353
1200	1090	-	-	338	509
1400	1508	-	-	-	706
<b>Ч е т ы р ь х х о д о в ы е</b>					
600	210	-	49	65	98
800	408	-	96	128	193
1000	702	-	162	218	329
1200	1028	-	-	318	479
1400	1434	-	-	-	672
<b>Ш е с т и х о д о в ы е</b>					
600	198	-	46	62	93
800	392	-	93	123	185
1000	678	-	160	213	319
1200	1000	-	-	314	471
1400	1400	-	-	-	659

Испарители с паровым пространством с плавающей головкой ИП и с U-образными трубами ИУ предназначены для испарения газовых фракций из жидких сред. Параметры испарителей с паровым пространством приведены в табл. 26.

## ПАРАМЕТРЫ КОЖУХОТРУБЧАТЫХ ИСПАРИТЕЛЕЙ С ПАРОВЫМ ПРОСТРАНСТВОМ

Таблица 26

Внутренний диаметр кожуха $D$ , мм	Внутренний диаметр распределительной камеры, мм	Наружный диаметр труб, мм	Количество теплообменных труб		Число ходов по трубам	Поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>		
			для типа			для типа		
			ИП	ИУ		ИП	ИУ	
800	500	20	-	104	2	-	80	
		25	82	-		38	-	
1000	600	20	-	155		-	120	
		25	132	-		62	-	
1200	700	20	-	226		-	176	
		25	210	-		98	-	
1400	800	20	-	295		-	231	
		25	280	-		131	-	
1600	900	20	-	398		-	306	
		25	378	-		178	-	
1800	1000	20	-	490		2	-	387
		25	490	-			230	-
	1000	20	-	-	4	-	-	
		25	456	-		214	-	
	1100	1100	20	-	605	2	-	481
			5	632	-		297	-

Внутренний диаметр кожуха $D$ , мм	Внутренний диаметр распределительной камеры, мм	Наружный диаметр труб, мм	Количество теплообменных труб		Число ходов по трубам	Поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>	
			для типа			для типа	
			ИП	ИУ		ИП	ИУ
1800	1100	20	-	-	4	-	-
		25	596	-		281	-
2000	1200	20	-	733	2	-	586
		25	758	-		357	-
	1200	20	-	-	4	-	-
		25	716	-		337	-

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие для вузов / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – 12-е изд., стереотипное. Перепеч. с изд. 1987 г. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2005. – 575 с. ISBN 5-98535-020-7.

2. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд; пер. с англ. под ред. Б.И. Соколова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
Структура справочника .....	4
О системе единиц СИ.....	4
Плотность .....	7
Вязкость .....	10
Удельная теплоёмкость жидкостей и газов .....	17
теплопроводность жидкостей и газов .....	23
Удельная теплота парообразования (конденсации) .....	29
Давление насыщенных паров органических жидкостей.....	31
Коэффициенты уравнения Антуана .....	31
Свойства воды и водяного пара.....	36
Зависимость коэффициента трения $\lambda$ от критерия Рейнольдса .....	38
Ориентировочные значения коэффициента теплопередачи .....	40
Средние значения тепловой проводимости загрязнений стенки.....	41
Диаметры условного прохода штуцеров кожухотрубчатых теплообменников.....	43
Характеристики теплообменников ТН и ТКИ холодильников ХН и ХК с трубами 25×2 мм и 20×2 мм.....	43
Основные характеристики теплообменников ТН и ТКИ холодильников ХН и ХК с трубами 25×2 мм .....	44
Основные характеристики теплообменников ТН и ТКИ холодильников ХН и ХК с трубами 20×2 мм .....	46
Характеристики кожухотрубчатых конденсаторов КН и КК и испарителей ИН и ИК с трубами диаметром 25×2 мм.....	48
Параметры кожухотрубчатых конденсаторов КН и ККИ испарителей ИН и ИК с трубами 25×2 мм.....	49
Параметры кожухотрубчатых испарителей с паровым пространством.....	50
Библиографический список .....	52

*Учебное издание*

*ФИЛИППОВ Вячеслав Васильевич  
ИЗМАЙЛОВ Валентин Дмитриевич*

**Процессы и аппараты химической технологии**

Редактор *Е.В. Абрамова*  
Компьютерная верстка *И.О. Миняева*  
Выпускающий редактор *Ю.А. Петропольская*

Подписано в печать 17.05.21  
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная  
Усл. п. л. 3,16. Уч.-изд. л. 3,14  
Тираж 50 экз. Рег. № 33/21

---

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский государственный технический университет»  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии  
Самарского государственного технического университета  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус № 8