

И.Е. Идельчик

**Справочник по гидравлическим
сопротивлениям**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 528
ББК 38.2
И11

И11 **И.Е. Идельчик**
Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик – М.: Книга по Требованию, 2023. – 466 с.

ISBN 978-5-458-39006-4

ISBN 978-5-458-39006-4

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3	3-3. Перечень диаграмм коэффициентов сопротивления раздела III	80
Раздел первый		3-4. Диаграммы коэффициентов сопротивления	81
Общие сведения и указания к справочнику			
1-1. Основные условные обозначения, общие для всех разделов справочника	7	Раздел четвертый	
1-2. Общие указания	7	Внезапное изменение величины скорости и перетекание потока через отверстия (коэффициенты сопротивления участков с внезапным расширением, шайб, диафрагм, проемов и др.)	
1-3. Свойства жидкостей и газов	9	4-1. Основные условные обозначения	100
а) Удельный вес	9	4-2. Пояснения и практические рекомендации	100
б) Вязкость	10	4-3. Перечень диаграмм коэффициентов сопротивления раздела IV	111
1-4. Равновесие жидкостей и газов	16	4-4. Диаграммы коэффициентов сопротивления	112
1-5. Движение жидкостей и газов	17	Раздел пятый	
а) Расход и средняя скорость потока	17	Плавное изменение скорости потока (коэффициенты сопротивления диффузоров)	
б) Уравнение неразрывности потока	18	5-1. Основные условные обозначения	135
в) Уравнение Бернулли. Напоры. Самотяга	18	5-2. Пояснения и практические рекомендации	135
1-6. Истечение жидкостей и газов через отверстия	22	5-3. Перечень диаграмм коэффициентов сопротивления раздела V	146
а) Истечение несжимаемой жидкости (газа)	22	5-4. Диаграммы коэффициентов сопротивления	147
б) Истечение сжимаемого газа	25	Раздел шестой	
1-7. Режимы движения жидкости (газа)	26	Изменение направления потока (коэффициенты сопротивления изогнутых участков — колен, отводов и др.)	
1-8. Гидравлические сопротивления	28	6-1. Основные условные обозначения	169
1-9. Работа нагнетателя в сети	30	6-2. Пояснения и практические рекомендации	169
1-10. Примеры расчета гидравлического сопротивления сетей	32	6-3. Перечень диаграмм коэффициентов сопротивления раздела VI	180
Раздел второй		6-4. Диаграммы коэффициентов сопротивления	182
Движение потока по прямым трубам и каналам (коэффициенты сопротивления трения и шероховатость)		Раздел седьмой	
2-1. Основные условные обозначения	48	Слияние и разделение потока (коэффициенты сопротивления тройников и крестовин)	
2-2. Пояснения и практические рекомендации	48	7-1. Основные условные обозначения	222
2-3. Шероховатость труб и каналов	54	7-2. Пояснения и практические рекомендации	222
2-4. Перечень диаграмм коэффициентов сопротивления трения раздела II	57	7-3. Перечень диаграмм коэффициентов сопротивления раздела VII	231
2-5. Диаграммы коэффициентов сопротивления трения	58	7-4. Диаграммы коэффициентов сопротивления	233
Раздел третий			
Вход потока в трубы и каналы (коэффициенты сопротивления входных участков)			
3-1. Основные условные обозначения	72		
3-2. Пояснения и практические рекомендации	73		

Раздел восьмой

Движение потока через препятствия, равномерно распределенные по сечению (коэффициенты сопротивления решеток, сеток слоев, пучков, насадок и др.)

- 8-1. Основные условные обозначения 278
- 8-2. Пояснения и практические рекомендации . . . 279
- 8-3. Перечень диаграмм коэффициентов сопротив-
ления раздела VIII 288
- 8-4. Диаграммы коэффициентов сопротивления . 289

Раздел девятый

Движение потока через трубопроводную арматуру и лабиринты (коэффициенты сопротивления вентилей, задвижек, клапанов, лабиринтов, компенсаторов)

- 9-1. Основные условные обозначения 317
- 9-2. Пояснения и практические рекомендации 317
- 9-3. Перечень диаграмм коэффициентов сопро-
тивления раздела IX 322
- 9-4. Диаграммы коэффициентов сопротивления 323

Раздел десятый

Обтекание тел потоком в трубе (канале) (коэффициенты сопротивления участков с выступами, распорками, фермами и другими телами)

- 10-1. Основные условные обозначения 342
- 10-2. Пояснения и практические рекомендации 342

- 10-3. Перечень диаграмм коэффициентов сопро-
тивления раздела X 348
- 10-4. Диаграммы коэффициентов сопротивления 349

Раздел одиннадцатый

Выход потока из труб и каналов (коэффициенты сопротивления выходных участков)

- 11-1. Основные условные обозначения 361
- 11-2. Пояснения и практические рекомендации 361
- 11-3. Перечень диаграмм коэффициентов сопро-
тивления раздела XI 372
- 11-4. Диаграммы коэффициентов сопротивления 374

Раздел двенадцатый

Движение потока через различные аппараты (коэффициенты сопротивления полных аппаратов и других устройств)

- 12-1. Основные условные обозначения 400
- 12-2. Пояснения и практические рекомендации 400
- 12-3. Перечень диаграмм коэффициентов (или ве-
личин) сопротивления раздела XII 411
- 12-4. Диаграммы коэффициентов сопротивления 412
- Использованная и рекомендуемая литература 446
- Предметный указатель 456

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К СПРАВОЧНИКУ

1-1. ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ОБЩИЕ ДЛЯ ВСЕХ РАЗДЕЛОВ СПРАВОЧНИКА

F — площадь сечения, м^2 ;
 D — диаметр сечения, м ;
 D_r, d_r — гидравлические диаметры (учтенные гидравлические радиусы), м ;
 Π — периметр сечения, м ;
 $\bar{f}$ — коэффициент живого сечения;
 l — длина участка, м ;
 h — высота, м ;
 R, r — радиусы сечения или закруглений, м ;
 Δ — средняя высота выступов шероховатости стенок, м ;
 $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{D_r}$ — относительная шероховатость;
 n — отношение площадей или число элементов;
 α — угол расширения или сужения сечения, а также угол набегания потока;
 w — скорость потока, м/сек ;
 p — давление (абсолютное), кг/м^2 ;
 H — избыточное давление, кг/м^2 ;
 ΔH — потеря давления (сопротивление), кг/м^2 ;
 ΔE — потеря энергии, $\text{кг} \cdot \text{м/сек}$;
 Q — секундный объемный расход текущей среды, $\text{м}^3/\text{сек}$;
 G — секундный весовой расход текущей среды, кг/сек ;
 γ — удельный вес текущей среды, кг/м^3 ;
 $\rho = \frac{\gamma}{g}$ — массовая плотность текущей среды, $\text{кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^3$;
 g — ускорение силы тяжести, м/сек^2 ;
 η — динамический коэффициент вязкости;
 ν — кинематический коэффициент вязкости;
 T — абсолютная температура среды, $^\circ\text{K}$;
 t — температура среды, $^\circ\text{C}$;

c_p, c_v — средняя теплоемкость газов соответственно при постоянном давлении и постоянном объеме, $\text{ккал/кг} \cdot \text{град}$;

$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ — показатель адиабаты;

ζ — коэффициент гидравлического сопротивления;

λ — коэффициент сопротивления трения единицы относительной длины (длины в один диаметр сечения) рассчитываемого участка;

C_x — коэффициент лобового сопротивления;

φ — коэффициент скорости;

ε — коэффициент заполнения сечения (коэффициент сжатия);

μ — коэффициент расхода;

Re — число Рейнольдса.

1-2. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

1. Основными справочными данными здесь являются коэффициенты сопротивления трения ζ_{tr} в прямых трубах и каналах и коэффициенты местных гидравлических сопротивлений ζ_m фасонных частей трубопроводов, дроссельных устройств, различных препятствий и других элементов сетей, а также некоторых промышленных аппаратов и устройств.

2. При пользовании справочником предполагается, что все величины, входящие в известную расчетную формулу сопротивления [см. (1-66)]:

$$\Delta H_{\text{сумм}} = \zeta_{\text{сумм}} \frac{\gamma w_0^2}{2g} = \zeta_{\text{сумм}} \frac{\gamma}{2g} \left(\frac{Q}{F_0} \right)^2 [\text{кг/м}^2], \quad (1-1)$$

кроме суммарного коэффициента гидравлического сопротивления $\zeta_{\text{сумм}} = \zeta_m + \zeta_{tr}$, а также все геометрические параметры рассчитываемого элемента сети и другие условия дви-

жения заданы. Искомым является только величина $\zeta_{\text{сумм}}$ или просто ζ^* и соответственно ζ_m и $\zeta_{\text{тр}}$.

3. На всех диаграммах, относящихся к элементам труб и каналов сравнительно небольшой протяженности, для которых значения $\zeta_{\text{тр}}$ пренебрежимо малы по сравнению с ζ_m , коэффициент местного сопротивления может рассматриваться как суммарный коэффициент ζ .

4. На диаграммах, относящихся к элементам труб и каналов сравнительно большой протяженности (диффузоры, плавные отводы и др.), приводятся значения как коэффициентов местного сопротивления ζ , так и коэффициентов сопротивления трения $\zeta_{\text{тр}}$.

На тех диаграммах, на которых приводятся грубоориентировочные данные, значения коэффициентов сопротивления следует рассматривать как суммарные коэффициенты ζ . В силу сказанного при суммировании всех потерь в рассчитываемой сети потери на трение в фасонных частях не следует учитывать дополнительно.

5. Приводимые в справочнике значения ζ_m учитывают не только местные потери давления, возникающие на коротком участке, непосредственно вблизи изменения конфигурации рассматриваемого элемента трубы (канала), но и потери давления, связанные с дальнейшим выравниванием скоростей по сечению вдоль следующего за элементом прямого выходного участка. В то же время, поскольку местные потери определяются в опытах условно как разность между общими потерями и потерями трения в выходном участке, последние следует вновь учитывать.

6. В случае выхода потока из фасонной или другой части в большой объем или в атмосферу, приводимые для них коэффициенты местного сопротивления учитывают также потери скоростного (динамического) давления $\frac{\rho w_{\text{вых}}^2}{2g}$ при выходе (где $w_{\text{вых}}$ — скорость в выходном сечении сети).

7. Значения коэффициентов местного сопротивления, приводимые в справочнике, за исключением специально изученных случаев, даются для условий равномерного распределения скоростей во входном сечении рассмат-

риваемого элемента трубы (канала), как это обычно имеет место, например, за плавным входным коллектором.

8. Влияние на местное сопротивление рассчитываемого элемента близко расположенных впереди (по ходу потока) фасонных частей или препятствий, а также длинных прямых участков приведенными в справочнике значениями ζ не учитывается, кроме специально оговоренных случаев. Это влияние в одних случаях сказывается в увеличении значения ζ_m рассматриваемого элемента, а в других даже в его уменьшении. Общего метода учета этого влияния пока нет.

9. Зависимость коэффициентов местного сопротивления от числа Рейнольдса приводится только в тех случаях, когда его влияние известно или может быть оценено приблизительно.

Практически влияние Re на местное сопротивление сказывается главным образом при малых его значениях ($Re < 10^5 - 2 \cdot 10^6$). Поэтому при $Re > 10^5 - 2 \cdot 10^6$ можно почти всегда считать коэффициенты местного сопротивления не зависящими от этого числа. При меньших числах Re его влияние следует учитывать по данным справочника.

В тех случаях, когда в справочнике не указано, при каких значениях Re получены приведенные значения ζ , можно в случае турбулентного режима ($Re > 10^3$) коэффициент сопротивления принимать практически не зависящим от числа Рейнольдса даже при малых его значениях. При ламинарном же режиме течения ($Re < 10^3$) можно пользоваться данными справочника только для очень грубой оценки сопротивления.

10. Почти все значения коэффициентов сопротивления, приведенные в справочнике, за исключением специально оговоренных, получены при числах Маха — $M = \frac{w}{a} \leq 0,3$. Однако практически всеми значениями ζ , ζ_m и $\zeta_{\text{тр}}$ можно пользоваться и при больших дозвуковых скоростях — примерно в пределах до $M = 0,7 - 0,8$. В отдельных случаях дается зависимость ζ от числа M .

11. Большинство данных по коэффициентам местного сопротивления получено при технически гладких стенках каналов, влияние же шероховатости на местное сопротивление мало изучено. Поэтому во всех случаях, где нет специальных оговорок, следует считать стенки рассматриваемых в справочнике фасонных и других участков гладкими. Влияние шерохо-

* В дальнейшем для простоты индекс „сумм“ при суммарном коэффициенте сопротивления ζ и при суммарной величине сопротивления (ΔH) будет везде опущен.

ватости (которая практически начинает сказываться лишь при числах Рейнольдса порядка $Re > 4 \cdot 10^4$) можно учесть приближенно, вводя к коэффициенту ζ множитель порядка 1,1—1,2 (а при большой шероховатости и более).

12. Форма поперечного сечения фасонных и других участков указана в справочнике для тех случаев, когда она влияет на коэффициент сопротивления или когда значения этого коэффициента получены для определенной формы сечения. Во всех прочих случаях, когда форма поперечного сечения участка специально не оговорена, или не приведены дополнительные данные по сопротивлению элементов некруглого сечения, следует принимать коэффициент сопротивления для многоугольного или прямоугольного сечений с отношением сторон по крайней мере в пределах $\frac{a_0}{b_0} = 0,6 - 1,7$ таким же, как и при круглом сечении.

13. Приводимые в справочнике графики (таблицы) сопротивления составлены или на основании расчетных формул, или на основании экспериментальных данных. В последнем случае значения ζ , выражаемые приближенными формулами, могут несколько расходиться с данными графиков (таблиц). Формулы при этом могут служить только для приближенных расчетов.

14. Поскольку коэффициенты гидравлических сопротивлений не зависят от рода среды¹, протекающей через трубопровод (канал), а определяются главным образом геометрическими параметрами рассматриваемого элемента сети и в отдельных случаях режимом течения (числом Рейнольдса, числом Маха), то данные, приведенные в справочнике, в одинаковой степени пригодны как для расчета сопротивления чисто гидравлических сетей, так и для расчета газовых, воздушных и других сетей и аппаратов.

15. Для проведения полного расчета гидравлического сопротивления целой сети можно воспользоваться предлагаемыми формами рас-

четных таблиц (см. примеры гидравлического расчета, табл. 1-10 и др.).

16. Значения коэффициентов сопротивления даны в справочнике для различных форм и параметров элементов труб и каналов. Однако при проектировании новых сетей следует стремиться к выбору оптимальных форм и параметров элементов труб и каналов, при которых получаются минимальные коэффициенты сопротивления.

Минимальные значения ζ могут быть легко выявлены как на основании кривых (таблиц) сопротивления, приведенных на диаграммах, так и руководствуясь рекомендациями, приводимыми в пояснительной части к каждому разделу справочника.

17. В перечне диаграмм коэффициентов сопротивления, помещенном перед каждым разделом, указываются как источник, так и способ получения (экспериментально, теоретически или ориентировочно) этих коэффициентов, что позволяет судить о степени их надежности.

1-3. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

а) Удельный вес

1. Удельный вес γ представляет собой отношение веса данного тела к его объему или же вес единицы объема. В технике удельный вес обычно принимается в $кг/м^3$.

2. Значения удельного веса воды приведены в табл. 1-1. Удельный вес некоторых других технических жидкостей при различных температурах приведен в табл. 1-2.

Значения удельного веса некоторых технических газов в нормальном состоянии ($0^\circ C$, 760 мм рт. ст., сухой газ— $t=0$), а также их относительный вес по отношению к воздуху, удельный вес которого принят за единицу, приведены в табл. 1-3.

3. Для многокомпонентных газов (доменный, коксовый и т. п.) удельный вес (смеси) определяется по формуле:

$$\gamma_{см} = \frac{\gamma_{к1}v_1 + \gamma_{к2}v_2 + \gamma_{к3}v_3 + \dots + \gamma_{кn}v_n}{100} \quad [кг/м^3 \text{ сух.}],$$

Таблица 1-1

Удельный вес воды [Л. 1-21]

$t, ^\circ C$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160
$\gamma, кг/м^3$	999,87	999,73	998,23	995,67	992,24	988,07	983,24	977,81	971,83	965,34	958,38	943,4	926,4	907,5

¹ Имеется в виду однородная среда.

Таблица 1-2

Удельный вес различных жидкостей
при давлении 1 ата [Л. 1-7, 1-8]

Наименование жидкости	°C	γ , кг/м³
Аммиак	—34	684
Анилин	15	1 004
Ацетон	15	790
Бензин	15	680—740
Бензол	15	900
	60	882
Бром	15	3 190
Бутан (нормальный)	—0,5	601
Вода	(см. табл. 1-1)	—
Вода морская	15	1 020—1 030
Глицерин (безводный)	15	1 270
	18	1 260
	20	1 250
Деготь каменноугольный	15	1 200
Дихлорэтан	15	1 175—1 200
Двуокись азота	3,2	1 484
Двуокись серы	—10	1 472
Керосин	15	790—820
Масло из буроугольной смеси	20	970
Масло деревянное	15	920
Масло касторовое	15	970
Масло кокосовое	15	930
Масло льняное (вар)	15	940
Масло машинное весьма жидкотекучее	10	899
	20	898
	50	895
Масло машинное среднее	10	899
	20	898
	50	895
Масло минеральное смазочное	15	890—960
Масло оливковое	15	920
Масло парафиновое	18	925
Масло терпентиновое	15	870
Масло хлопковое	15	930
Нефть натуральная	15	700—900
Озон	—5	537
Сероуглерод	15	1 290
Серная кислота (87%)	15	1 800
Серная кислота (дым- щаяся)	15	1 890
Скипидар	18	870
Ртуть	20	13 546
Спирт метиловый	15	810
Спирт этиловый	15—18	790
Тетрабромэтан	15	2 964
Хлор	0	1 469
Хлористый метил	0	954
Хлористый этил	0	919
Хлорсформ	15—18	1 480
Цианистый водород	0	715
Эфир этиловый	15—18	740

Таблица 1-3

Удельный вес сухого газа при 0° С и 1 ата и
теплотемкость при 20° С 1 кг сухого газа [Л. 1-8]

Наименование газов	Химическая формула	Удельный вес γ , кг/м³	Относительный вес (уд. вес воздуха равен 1,0)	c_p	c_v	$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$
Азот	N ₂	1,2507	0,9672	0,250	0,178	1,40
Аммиак	NH ₃	0,7710	0,5962	0,530	0,400	1,29
Аргон	Ar	1,7820	1,3781	0,127	0,077	1,66
Ацетилен	C ₂ H ₂	1,1710	0,9056	0,402	0,323	1,25
Бензол	C ₆ H ₆	3,4840	2,6950	0,299	0,272	1,10
Бутан (нормальный)	C ₄ H ₁₀	2,6730	2,0672	0,458	0,414	1,11
1-бутан	C ₄ H ₁₀	2,6680	2,0633	0,390	—	—
Воздух	—	1,2930	1,0000	0,241	0,172	1,40
Водород	H ₂	0,0899	0,6450	3,410	2,420	1,41
Водяной пар	H ₂ O	0,8040	0,6218	—	—	—
Гелий	He	0,1785	0,1380	1,260	0,760	1,66
Закись азота	N ₂ O	1,9780	1,5297	0,210	0,164	1,28
Кислород	O ₂	1,4290	1,1051	0,218	0,156	1,40
Криптон	Kr	3,7080	2,8677	0,060	0,036	1,67
Ксенон	Xe	5,8510	4,5252	0,038	0,023	1,70
Метан	CH ₄	0,7170	0,5545	0,531	0,405	1,31
Неон	Ne	0,9002	0,6962	0,248	0,148	1,68
Озон	O ₃	2,2200	1,7169	—	—	1,29
Окись азота	NO	1,3400	1,0363	0,233	0,166	1,38
Окись углерода	CO	1,2500	0,9667	0,250	0,180	1,40
Пропан	C ₃ H ₈	2,0200	1,5622	0,445	0,394	1,13
Пропилен	C ₃ H ₆	1,9140	1,4802	0,390	0,343	1,17
Сероуглерод	H ₂ S	1,5390	1,1902	0,253	0,192	1,30
Сероокись углерода	COS	2,7210	2,1044	—	—	—
Двуокись серы	SO ₂	2,9270	2,2637	0,151	0,120	1,25
Углекислый газ	CO ₂	1,9760	1,5282	0,200	0,156	1,30
Хлор	Cl ₂	3,2170	2,4880	0,115	0,085	1,36
Хлористый метил	CH ₃ Cl	2,3080	1,7772	0,177	0,139	1,28
Этан	C ₂ H ₆	1,3570	1,0486	0,413	0,345	1,20
Этилен	C ₂ H ₄	1,2610	0,9752	0,365	0,292	1,25

где $\gamma_{k1}, \gamma_{k2}, \dots, \gamma_{kn}$ — удельный вес компонентов, входящих в смесь при 0° С и 760 мм рт. ст. (см. табл. 1-3),
кг/м³ сух.;

$v_1, v_2, \dots, v_n$ — объемный процент компонентов смеси по данным газозологического анализа.

б) Вязкость

1. Вязкость свойственна всем реальным жидкостям и газам и проявляется при движении в виде внутреннего трения.

Таблица 1-4

Переводные множители для динамической вязкости (η)

Единица измерения Задано	перевести на	Микропуаз (мкпз)	Сантипуаз (спз)	Пуаз, г/см·с.к (пз)	кг м·сек	кг м·ч	кг·сек м²	фунт фут·сек	фунт фут·ч
мкпз		1	10^{-4}	10^{-3}	10^{-7}	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-8}$	$6,72 \cdot 10^{-8}$	$2,42 \cdot 10^{-4}$
спз		10^4	1	10^{-3}	10^{-2}	3,6	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$6,72 \cdot 10^{-4}$	2,42
пуаз, г/см·с.к (пз)		10^6	10^3	1	10^{-1}	$3,6 \cdot 10^2$	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$6,72 \cdot 10^{-2}$	$2,42 \cdot 10^3$
кг м·сек		10^7	10^3	10	1	$3,6 \cdot 10^3$	$1,02 \cdot 10^{-1}$	$6,72 \cdot 10^{-1}$	$2,42 \cdot 10^3$
кг м·ч		$2,78 \cdot 10^3$	$2,78 \cdot 10^{-1}$	$2,78 \cdot 10^{-2}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	1	$2,84 \cdot 10^{-3}$	$1,863 \cdot 10^{-4}$	$6,72 \cdot 10^{-1}$
кг·сек м²		$9,81 \cdot 10^7$	$9,81 \cdot 10^3$	$9,81 \cdot 10^3$	9,81	$3,53 \cdot 10^4$	1	6,592	$2,374 \cdot 10^4$
фунт фут·сек		$1,488 \cdot 10^7$	$1,488 \cdot 10^3$	$1,488 \cdot 10^3$	1,488	$4,13 \cdot 10^3$	$1,52 \cdot 10^{-1}$	1	$3,6 \cdot 10^3$
фунт фут·ч		$4,13 \cdot 10^3$	$4,13 \cdot 10^{-1}$	$4,13 \cdot 10^{-2}$	$4,13 \cdot 10^{-4}$	1,488	$4,21 \cdot 10^{-3}$	$2,77 \cdot 10^{-4}$	1

Различают: 1) абсолютную или динамическую вязкость (динамический коэффициент вязкости) η , представляющую собой отношение напряжения сдвига к градиенту скорости (изменению скорости на единицу длины нормали к направлению движения жидкости или газа), т. е.

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{dw}{dy}}, \quad (1-2)$$

где τ — напряжение сдвига;

$\frac{dw}{dy}$ — градиент скорости w в направлении нормали y ;

2) кинематическую вязкость (кинематический коэффициент вязкости) ν , представляющую отношение динамической вязкости к плотности жидкости (газа).

2. Единицей динамической вязкости в системе CGS служит пуаз (пз), в этом случае напряжение сдвига выражается в дин/см^2 , а градиент скорости в см/см·сек .

Таким образом,

$$1 \text{ пз} = 1 \frac{\text{дин·сек}}{\text{см}^2} = 1 \frac{\text{г}}{\text{см·сек}}.$$

Обычно за единицу динамической вязкости принимают сантипуаз (спз), т. е. величину, в 10^3 раз меньшую, или микропуаз (мкпз), в 10^6 раз меньшую:

$$\frac{\text{дин·сек}}{\text{см}^2} = 1 \text{ пз} = 100 \text{ спз} = 10^6 \text{ мкпз}.$$

В технической системе единиц единицей

динамической вязкости служит $\frac{\text{кг}}{\text{м·ч}}$ (где кг — единица массы) или $\frac{\text{кг·сек}}{\text{м}^2}$ (где кг — единица силы).

Единицей кинематической вязкости в системе CGS служит стокс (ст), $\frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$, или сантистокс (сст), $\frac{\text{мм}^2}{\text{сек}}$, в 10^3 раз меньшая величина, а в технической системе единиц — $\frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$.

3. Для перевода из одной системы единиц в другую в табл. 1-4 и 1-5 приведены переводные множители соответственно для динамической вязкости η и для кинематической вязкости ν .

4. Примеры перевода единиц измерения вязкости.

а) Задана величина динамической вязкости газа (воздуха) в пуазах — $\eta_{\text{пз}} = 180,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{г}}{\text{см·сек}}$.

Перевести в техническую систему единиц ($\eta_{\text{т.с}} [\text{кг·сек/м}^2]$).

По табл. 1-4 переводной множитель равен $1,02 \cdot 10^{-2}$. Отсюда

$$\eta_{\text{т.с}} = 1,02 \cdot 10^{-2} \eta_{\text{пз}} = 1,02 \cdot 10^{-2} \times$$

$$\times 180,9 \cdot 10^{-6} \approx 1,85 \cdot 10^{-8} \text{ кг·сек/м}^2.$$

б) Задана величина динамической вязкости воды в английской системе единиц — $\eta_{\text{англ}} = 6,92 \times 10^{-6} \text{ фунт/фут·сек}$.

Перевести в техническую систему (кг·сек/м^2).

По табл. 1-4 переводной множитель равен $1,52 \times 10^{-1}$. Отсюда

$$\eta_{\text{т.с}} = 1,52 \cdot 10^{-1} \cdot 6,92 \cdot 10^{-6} = 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ кг·сек/м}^2.$$

Таблица 1-5

Переводные множители для кинематической вязкости (ν)

Единица измерения перевести на	Сантистокс, $\text{мм}^2/\text{сек}$ (сст)	Стокс, $\text{см}^2/\text{сек}$ (ст)	$\frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$	$\frac{\text{м}^2}{\text{ч}}$	$\frac{\text{фут}^2}{\text{сек}}$	$\frac{\text{фут}^2}{\text{ч}}$
Задано						
Сантистокс, $\text{мм}^2/\text{сек}$ (сст)	1	10^{-2}	10^{-6}	$3,60 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$3,85 \cdot 10^{-2}$
Стокс, $\text{см}^2/\text{сек}$ (ст)	10^2	1	10^{-4}	$3,60 \cdot 10^{-1}$	$1,07 \cdot 10^{-1}$	3,85
$\frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$	10^4	10^4	1	$3,60 \cdot 10^1$	$1,07 \cdot 10$	$3,85 \cdot 10^2$
$\frac{\text{м}^2}{\text{ч}}$	$2,78 \cdot 10^2$	2,78	$2,78 \cdot 10^{-4}$	1	$2,98 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10$
$\frac{\text{фут}^2}{\text{сек}}$	$9,35 \cdot 10^4$	$9,35 \cdot 10^2$	$9,35 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^2$	1	$3,60 \cdot 10^2$
$\frac{\text{фут}^2}{\text{ч}}$	$2,60 \cdot 10$	$2,60 \cdot 10^{-1}$	$2,60 \cdot 10^{-5}$	$9,35 \cdot 10^{-3}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	1

в) Задана величина коэффициента кинематической вязкости газа (воздуха) в сантистоксах— $\nu_{\text{сст}} = 15,0$.

Перевести в техническую систему единиц ($\nu_{\text{т.с.}}$, $\text{м}^2/\text{сек}$).

По табл. 1-5 переводной множитель равен 10^{-6} . Отсюда

$$\nu_{\text{т.с.}} = 10^{-6} \nu_{\text{сст}} = 15,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}.$$

г) Задана величина коэффициента кинематической вязкости воды в английской системе единиц ($\text{фут}^2/\text{ч}$)

$$\nu_{\text{англ.}} = 5,78 \cdot 10^{-1}.$$

Перевести в систему CGS (ст).

По табл. 1-5 переводной множитель равен $2,60 \times 10^{-1}$. Отсюда

$$\begin{aligned} \nu_{\text{ст}} &= 2,60 \cdot 10^{-1} \cdot \nu_{\text{англ.}} = \\ &= 2,60 \cdot 10^{-1} \cdot 5,78 \cdot 10^{-1} = 1,50 \cdot 10^{-2} \text{ ст}. \end{aligned}$$

5. При нахождении кинематической вязкости делением динамической вязкости на удельный вес или массовую плотность среды следует правильно выбирать размерности делимого и делителя. Так, например, для получения коэффициента кинематической вязкости ν в стоксах (ст) следует динамическую вязкость η принимать в пз и делить на удельный вес γ в г/см^3 (получается $\text{см}^2/\text{сек}$, т. е. ст); для получения ν в $\text{м}^2/\text{сек}$ η берется в кг·сек/м^2 и делится на массовую плотность $\rho = \frac{\gamma}{g}$ в $\frac{\text{кг·сек}^2}{\text{м}^3}$; для получения ν в $\text{м}^2/\text{ч}$ η берется в кг/м·ч и делится на удельный вес γ в $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

6. Динамическая и кинематическая вяз-

кости зависят от параметров состояния среды. При этом динамическая вязкость жидкостей и газов зависит только от температуры и не зависит от давления (для совершенных газов). С повышением температуры вязкость газов и паров повышается, а капельных жидкостей понижается. Для водяного пара наблюдается увеличение динамической вязкости с повышением давления.

Кинематическая вязкость жидкостей и газов зависит как от температуры, так и от давления.

7. Зависимость вязкости газов от температуры может быть приближенно выражена формулой Сутерленда:

$$\eta = \eta_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{1/2}, \quad (1-3)$$

где η_0 — динамическая вязкость газа при 0°C ;
 T — абсолютная температура, $^\circ \text{K}$;
 C — постоянная, зависящая от рода газа.

Значения динамической вязкости η в микропуазах для различных газов в зависимости от температуры, а также значения постоянной C и максимальная температура, при которой значение этой постоянной подтверждено опытом, приведены в табл. 1-6.

Значения кинематической вязкости ν в сст для тех же газов в зависимости от температуры при давлении 1 атм приведены в табл. 1-7.

Значения ν для воздуха в $\text{м}^2/\text{сек}$ приведены также на рис. 1-1.

Таблица 1-6

Динамическая вязкость газов η , $\text{мПа}\cdot\text{с}$, при давлении 1 атм в зависимости от температуры и значения постоянной C в формуле Сутерленда [Л. 1-7, 1-8, 1-19—1-21]

Наименование газа	Формула	Температура, °C											C	Темпера- турная граница, °C		
		-20	0	20	40	60	80	100	150	200	300	400			600	800
Азот	N ₂	157,5	166,0	174,8	183,5	192,5	200,0	208,2	229,0	246,0	281,0	311,0	366,0	413,0	104	25—280
Аммиак	NH ₃	86,0	93,0	100,5	107,8	114,5	121,5	128,0	146,0	—	—	—	—	—	503	20—300
Аргон	Ar	—	212,0	222,0	—	—	—	271,0	—	321,0	367,0	410,0	487,0	554,0	142	20—827
Ацетилен	C ₂ H ₂	90,2	96,0	102,1	108,2	114,5	120,2	126,0	—	—	—	—	—	—	215	—
Бензол	C ₆ H ₆	62,0	68,0	73,5	79,0	84,0	89,5	95,0	108,0	121,0	147,0	—	—	—	448	130—313
Бутан	C ₄ H ₁₀	—	69,0	74,0	—	—	—	95,0	—	—	—	—	—	—	358	—
Водород	H ₂	80,4	84,0	88,0	91,8	95,9	99,6	103,0	113,0	121,0	139,0	154,0	183,0	210,0	71,0	20—100
Водяной пар	H ₂ O	82,0	89,3	96,7	104,0	111,3	118,7	126,0	—	160,4	200,0	239,0	314,5	386,5	961	20—406
Воздух	—	62,0	171,2	180,9	190,4	199,8	208,9	219,0	—	260,2	297,2	330,1	390,6	443,0	111	16—825
Гелий	He	175,0	186,0	195,5	204,0	213,5	220,5	229,0	—	270,0	307,0	342,0	407,0	465,0	0	21—100
Двуокись серы	SO ₂	—	116,0	126,0	—	—	—	163,0	—	207,0	246,0	—	—	—	306	300—825
Закись азота	N ₂ O	—	137,0	146,0	—	—	—	183,0	—	225,0	265,0	—	—	—	260	25—280
Кислород	O ₂	181,5	192,0	202,5	213,0	223,5	234,0	244,0	—	290,0	331,0	369,0	435,0	493,0	125	20—280
Криптон	Kr	—	233,0	246,0	—	—	—	306,0	—	—	—	—	—	—	188	—
Ксенон	Xe	—	211,0	226,0	—	—	—	287,0	—	—	—	—	—	—	252	—
Метан	CH ₄	95,5	102,0	108,0	115,0	121,4	127,0	133,0	147,0	161,0	186,0	—	—	—	164	20—250
Окись азота	NO	—	179,0	188,0	—	—	—	227,0	—	268,0	—	—	—	—	128	20—250
Окись углерода	CO	159,5	168,0	176,6	185,5	191,5	202,4	210,2	229,0	247,0	279,0	—	—	—	100	До 130
Пентан (п)	C ₅ H ₁₂	—	62,0	—	—	—	—	—	100,0	103,0	—	—	—	—	383	—
Пропан	C ₃ H ₈	70,0	75,0	80,0	85,4	90,5	95,8	100,1	113,0	125,0	144,0	—	—	—	278	20—250
Пропилен	C ₃ H ₆	—	78,0	83,5	—	—	—	107,0	141,0	—	—	—	—	—	487	—
Сероводород	H ₂ S	—	116,0	124,0	—	—	—	159,0	—	—	—	—	—	—	331	—
Углекислый газ	CO ₂	128,0	138,0	147,0	157,0	167,0	175,5	184,5	—	226,0	264,0	299,0	362,0	413,5	254	—
Хлор	Cl	114,5	123,0	132,0	141,0	150,0	159,0	168,0	189,0	210,0	250,0	—	—	—	350	100—250
Хлористый метил	CH ₃ Cl	—	98,0	106,0	—	—	—	136,0	—	175,0	—	—	—	—	454	—
Хлористый этил	C ₂ H ₅ Cl	—	94,0	105,0	—	—	—	—	143,0	—	—	—	—	—	411	—
Цианистый водород	HCN	—	—	74,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	931	—
Этан	C ₂ H ₆	—	86,0	92,0	—	—	—	115,0	128,0	142,0	—	—	—	—	252	20—250
Этилен	C ₂ H ₄	88,5	94,5	101,0	107,0	112,0	118,5	124,0	140,0	154,0	—	—	—	—	225	20—250

Таблица 1-7
Кинематический коэффициент вязкости η , сСт, при давлении 1 атм в зависимости от температуры [Л. 1-7, 1-8, 1-19—1-21]

Наименование газа	Формула	Температура, °С													
		-20	0	20	40	60	80	100	150	200	300	400	600	800	
Азот	N ₂	11,67	13,30	15,00	16,85	18,80	20,65	22,30	28,30	34,10	47,20	61,40	93,50	130,00	
Аммиак	NH ₃	6,81	12,00	14,00	16,00	18,10	20,35	22,70	29,30	36,00	—	—	—	—	
Аргон	Ar	—	11,90	13,30	—	—	—	20,70	—	31,20	43,30	56,50	87,50	123,00	
Ацетилен	C ₂ H ₂	4,73	8,20	9,35	10,60	11,94	13,25	14,70	—	—	—	—	—	—	
Бензол	C ₆ H ₆	1,66	11,95	2,26	2,60	2,94	3,33	3,73	4,80	6,02	8,85	—	—	—	
Бутан	C ₄ H ₁₀	—	25,80	29,70	—	—	—	48,50	—	—	—	—	—	—	
Водород	H ₂	84,00	93,50	105,00	117,30	130,00	143,00	156,60	195,00	233,00	324,00	423,00	651,00	918,00	
Водяной пар	H ₂ O	9,50	11,12	12,90	14,84	16,90	18,66	21,50	—	—	—	—	—	—	
Воздух	—	11,66	13,20	15,00	16,98	18,85	20,89	23,00	30	34,90	48,20	63,20	96,50	134,00	
Гелий	He	9,12	10,40	11,74	13,12	14,55	15,97	17,50	—	26,20	36,10	47,30	72,80	102,50	
Диоксид серы	SO ₂	—	4,00	4,60	—	—	—	7,60	—	12,20	17,60	—	—	—	
Закись азота	N ₂ O	—	6,82	7,93	—	—	—	12,70	—	19,70	28,20	—	—	—	
Кислород	O ₂	11,04	13,40	15,36	17,13	19,05	21,16	23,40	—	35,20	48,70	63,80	97,50	135,70	
Криптон	Kr	—	6,26	7,13	—	—	—	13,70	—	—	—	—	—	—	
Ксенон	Xe	—	3,59	4,15	—	—	—	6,70	—	—	—	—	—	—	
Метан	CH ₄	12,57	14,20	16,50	18,44	20,07	22,90	25,40	31,8	39,00	54,50	—	—	—	
Оксид азота	NO	—	13,30	15,10	—	—	—	23,20	—	30,50	—	—	—	—	
Оксид углерода	CO	11,86	13,50	15,16	17,00	18,96	21,00	22,70	28,4	34,30	46,85	—	—	—	
Пропан	C ₃ H ₈	3,04	3,70	4,26	4,90	5,52	6,18	6,76	8,70	10,84	15,10	—	—	—	
Пропилен	C ₃ H ₆	—	4,08	4,70	—	—	—	7,70	11,4	—	—	—	—	—	
Сероводород	H ₂ S	—	7,62	8,70	—	—	—	14,10	—	19,80	28,00	37,30	65,20	82,00	
Углекислый газ	CO ₂	5,62	7,00	8,02	9,05	10,30	12,10	12,80	—	—	—	—	—	—	
Хлор	Cl ₂	3,09	3,80	4,36	5,02	5,66	6,36	7,15	9,10	11,50	16,25	—	—	—	
Хлористый метил	CH ₃ Cl	—	4,28	4,90	—	—	—	8,06	—	13,10	—	—	—	—	
Этан	C ₂ H ₆	—	6,35	7,28	—	—	—	11,60	14,70	18,10	—	—	—	—	
Этилен	C ₂ H ₄	6,80	7,50	8,66	9,73	10,85	12,15	13,40	17,30	21,20	—	—	—	—	