

р. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

№ 140

1958

Л. А. ТЕПАКС

**ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ
СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОДО-
ПРОВОДНЫХ ТРУБ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1958

Er. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

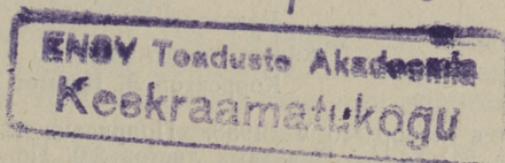
№ 140

1958

Л. А. ТЕПАКС

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ
СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОДО-
ПРОВОДНЫХ ТРУБ

Er. 1435



ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1958.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
1. Основные положения	3
2. Предлагаемые расчетные зависимости	10
3. Примеры расчета	17
4. Приложения	21
Литература	32

Л. А. Тепак

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОДОПРОВОДНЫХ ТРУБ

Издательство

Таллинского Политехнического Института

*

Редактор **Х. Вельнер**

Технический редактор **А. Тамм**

Корректор **Э. Нурмет**

Сдано в набор 10 V 1958. Подписано к печати 20 VI 1958.
Бумага 54×84^{1/16}. Печатных листов 2,0. По формату 60×92 печат-
ных листов 1,64. Учетно-издательских листов 1,42. Тираж 800.
МВ-04861. Заказ № 1547.

Типография «Юхисэлу», Таллин, ул. Пикк 40/42.

Цена 1 рубль.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основы гидравлического расчёта водопроводных труб разрабатываются уже свыше ста лет. Теоретическое решение вопроса имеется в случае ламинарного режима движения жидкости; для турбулентного режима такого теоретического решения нет.

Огромное количество эмпирических формул, также и наличие разных шкал коэффициентов шероховатости, опубликованных в литературе, могут дезориентировать инженера-проектировщика при расчёте трубопроводов.

Исходя из более или менее обоснованных теоретических предпосылок, в работах Л. Прандтля¹ и И. Никурадзе^{2,3} впервые предложено представлять результаты опытов в виде кривой по выражению

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} - 2 \lg \frac{r}{k} = f \left(\lg \frac{ku_*}{v} \right), \quad (1)$$

причём точки, полученные при геометрически подобных структурах шероховатости, но при этом с разными размерами выступов, укладываются на одну кривую, выражаемую формулой (1).

И. Никурадзе, желая учесть влияние размера выступов шероховатости, пользовался отсеянным песком, наклеенным на поверхность стенки.

Другие исследователи (Ф. Галавиц⁴, Э. Циммерман⁵, Г. А. Мурин⁶) доказали применимость выражения типа (1) для стальных труб. Вместе с тем, при обработке многочисленных опытов, появилось новое понятие для характеризования шероховатости — эквивалентная шероховатость k_s , определяемая по опытам в квадратичной области сопротивления и вычисляемая по формуле Л. Прандтля

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{\text{кв}}}} = 1,74 + 2 \lg \frac{r}{k_s}. \quad (2)$$

Автором использованы данные опытов Ф. А. Шевелева^{7,9} о сопротивлении разных труб: стальных и чугунных (новых и бывших в эксплуатации), а также асбестоцементных. Обработка этих опытов подтвердила пригодность выражения (1); можно утверждать, что это выражение действительно для круглых труб с всевозможными шероховатостями.

Не останавливаясь подробно на теоретических рассуждениях, изложенных в ранее опубликованных работах автора^{9,10}, приводим в нижеследующем лишь основные исходные положения:

1. Для определения сопротивления гладких труб за основу принимается формула Прандтля

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -0,8 + 2 \lg(\operatorname{Re} \sqrt{\lambda}), \quad (3)$$

которую можно представить также в виде

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0,7 + 2 \lg \frac{ru^*}{v}. \quad (4)$$

Сопротивление шероховатых труб в квадратичной области определяется по видоизмененной формуле Прандтля

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{\text{кв}}}} = 0,7 + 2 \lg \frac{r}{\Delta}. \quad (5)$$

Эта формула отличается от формулы (2) лишь численным значением коэффициента и это отличие не имеет принципиального характера. Вместе с тем вводится новое понятие абсолютной шероховатости Δ , имеющее размерность длины. При этом имеет место равенство

$$\Delta = 0,3k = 0,3k_9. \quad (6)$$

Преимущество нового понятия абсолютной шероховатости заключается в том, что формулы (4) и (5) имеют одинаковые значения численных коэффициентов, что упрощает в некоторой мере изучение сопротивления в доквадратичной области и, в частности, рассмотрение развития пристенной турбулентности¹⁰. Следует отметить, что коэффициент 1,74 в формуле (2) получен для зернистой шероховатости И. Никурадзе, которая не является типичной.

В таблице 2 приводятся значения шероховатости Δ в понятии автора. Для сопоставления этих значений с эквивалентными шероховатостями k следует пересчитать последние по равенству (6).

2. Основным параметром, определяющим пределы отдельных областей сопротивления, т. е. области гладкой трубы, также и доквадратичной и квадратичной областей, является безразмерная величина $\frac{\Delta u_*}{v}$, или, что принципиально то же самое, пропорциональная величина $\frac{ku_*}{v}$, введенная И. Никурадзе.

Характерные значения $\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_0$, определяющие переход от области гладкой трубы к доквадратичной, также и значения $\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_1$, соответствующие переходу от доквадратичной области к квадратичной, приводятся в таблице 2.

Следует отметить, что Ф. А. Шевелевым^{7,8} предлагается, на основе обработки тех же опытных данных, новый критерий $\frac{v}{\lambda}$, определяющий начало квадратичной области. Этот факт заслуживает внимания и требует проверки.

С подстановкой

$$v = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} u_*,$$

можно написать

$$\frac{v}{\lambda} = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \cdot \frac{\lambda u_*}{\Delta},$$

причём переход в квадратичную область происходит при

$$\frac{v}{\lambda} = \sqrt{\frac{8}{\lambda_{\text{КВ}}}} \cdot \frac{\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_1}{\Delta}. \quad (7)$$

Величины $\lambda_{\text{КВ}}$ взяты нами из работ Ф. А. Шевелева. По этим величинам подсчитаны абсолютные шероховатости Δ , пользуясь формулой (5). Значения $\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_1$ взяты из таблицы 2, причём данные таблицы получены по обработке тех же опытов Ф. А. Шевелева. Результаты проверочных расчётов по выражению (7) приводятся в нижеследующей таблице 1, причём рассматриваются лишь наиболее изученные шероховатости, т. е. трубы с наибольшим числом разных диаметров: стальные (без стыков) и новые асбестоцементные.

Таблица 1

Наименование труб	D мм	100λ _{кв}	Δ мм	$\frac{V}{v} \cdot 10^6$
Новые стальные $\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_1 = 4,23$	15,55	3,15	0,0265	2,54
	26,2	2,77	0,0290	2,48
	52,4	2,37	0,0330	2,35
	78,5	2,13	0,0329	2,49
	155,1	1,88	0,0392	2,23
	302,0	1,61	0,0338	2,43
Новые асбестоцементные $\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_1 = 3,26$	50,7	1,82	0,0112	6,10
	75,8	1,68	0,0117	6,08
	141,3	1,49	0,0127	5,95
	278,0	1,31	0,0133	6,06

Из таблицы 1 видно, что значения $\frac{V}{v}$ для однотипных шероховатостей изменяются в узких пределах. Величины $2,4 \cdot 10^6$ для новых стальных и $6,0 \cdot 10^6$ для асбестоцементных труб, предложенные Ф. А. Шевелевым, в данном случае вполне обоснованы. Однако это обстоятельство обусловлено только тем, что в исследованных трубах шероховатость несколько увеличивалась с диаметром труб, что можно объяснить, повидимому, технологией изготовления труб. Следует отметить, что в исследованиях Г. А. Мурина⁶ никакой связи шероховатости с диаметром не обнаружилось.

Очевидно, что постоянство критерия $\frac{V}{v}$ связано со специфическими условиями и имеет случайный характер. Определяющим критерием является величина $\frac{\Delta u_*}{v}$, как это доказано многочисленными исследованиями.

Для случаев, представляющих наибольший практический интерес, т. е. для стальных и чугунных труб в условиях эксплуатации, преимущество критерия $\frac{\Delta u_*}{v}$ показано в работе Ф. А. Шевелева (рис. 58 в цит. работе⁷). Величина $\frac{V}{v} = 9,2 \cdot 10^5$, принятая за основу при составлении «Таблиц для гидравлического расчёта стальных, чугунных и асбестоцементных водопроводных труб»¹¹ не обоснована, в чем нетрудно убедиться по результатам обработки опытов.

3. На современном уровне наших знаний следует производить гидравлические расчёты труб с учётом достижений полуэмпирических теорий турбулентности. Сопротивление в квадратичной области целесообразно определять по формуле (2) или (5).

Наряду с логарифмической формулой в настоящее время часто пользуются показательными формулами, основной формой которых является формула Н. Н. Павловского

$$C = \frac{1}{n} R^y. \quad (8)$$

Путем простейших преобразований формулу (8) можно представить в виде

$$\lambda_{\text{кв}} = \frac{x}{D^z}, \quad (9)$$

где

$$z = 2y \text{ и } x = 2^{3+4y} \text{ gn}^2.$$

Как известно, Н. Н. Павловский предложил формулу, согласно которой показатель степени y зависит от шероховатости и гидравлического радиуса. Однако, многочисленные опыты, произведённые за последние годы, показывают, что y изменяется в более широких пределах, чем это возможно по формуле Н. Н. Павловского. Поэтому формулу (9) следует рассматривать как имеющую два самостоятельных коэффициента x и z , определяемые опытами. Например, в работах Ф. А. Шевелева^{7,8}, где приводятся значения этих коэффициентов, для всех исследованных шероховатостей коэффициенты имеют разные значения. Наличие двух эмпирических коэффициентов по сравнению с одним (абсолютной шероховатостью) в логарифмической формуле является одним из недостатков формул типа (9).

Вторым недостатком следует признать обстоятельство, что показательные формулы, являясь чисто эмпирическими, могут быть использованы только в пределах, соответствующих условиям проведения опытов и их экстраполяция является рискованной. Так например, формула Ф. А. Шевелева для стальных и чугунных труб в эксплуатации

$$\lambda_{\text{кв}} = \frac{0,0210}{D^{0,3}} \quad (10)$$

получена по опытам с трубами больших диаметров $D=600-1200$ мм. Распространение этой формулы на весь диапазон изготавливаемых труб с $D=8-1400$ мм, как это сделано в «Таблицах для гидравлического расчёта стальных, чугунных и асбестоцементных водопроводных труб»¹¹, совершенно не обосновано.

4. Наиболее сложным является вопрос о сопротивлении в доквадратичной области. Давно уже известно, что вид кривой $\lambda(Re)$ зависит от структуры шероховатости. В случае зернистой шероховатости эта кривая имеет минимум, в то время как для большинства случаев промышленных труб кривая $\lambda(Re)$ имеет вид монотонной функции, без минимума.

Предложено множество формул, отражающих уменьшение коэффициента сопротивления при возрастающих числах Рейнольдса. В большинстве случаев эти формулы получены путём объединения формул гладкой трубы и квадратичного сопротивления. К таким формулам можно отнести формулы:

Кольбрука-Уайта¹²

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{k_s}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right), \quad (11)$$

А. Д. Альтшуля¹³

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,8 \lg \frac{Re}{\frac{k_s}{D} + 7}, \quad (12)$$

Н. З. Френкеля¹⁴

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[\frac{k_s}{3,7D} + \left(\frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right]. \quad (13)$$

Все эти формулы дают весьма близкие друг к другу результаты и страдают общими недостатками. Подробное изучение развития пристенной турбулентности¹⁰ показывает, что зависимость $\lambda(Re)$ имеет отличный характер для отдельных типов шероховатости. Получить единую формулу без дополнительных коэффициентов невозможно даже для промышленных труб. Невозможно также определить единые для всех типов шероховатости пределы доквадратичной области. По формуле (11), (а также и по формулам (12) и (13)), при равных относительных шероховатостях и числах Рейнольдса, получаем равные коэффициенты сопротивления для всех типов шероховатости,

что не соответствует действительности. Например, чугунные трубы имеют в равных условиях значительно больший коэффициент сопротивления, чем стальные.

Опыты показывают также, что в случае большой шероховатости область гладкой трубы вообще отсутствует. Это наблюдается у стальных и чугунных труб в эксплуатации, т. е. в случае, представляющем наибольший практический интерес.

Недостатки формул (11), (12) и (13) устранены в формуле Г. А. Адамова¹⁵

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = m \lg \left[[f_1(\text{Re})]^{\frac{m_1}{m}} + [f_2\left(\frac{k_{\text{э}}}{D}\right)]^{\frac{m_2}{m}} \right]. \quad (14)$$

При соответствующем подборе коэффициентов, а также и функций, входящих в (14), можно получить кривые, изображающие сопротивление различных шероховатостей.

Исходя из теоретических соображений, мы считаем более правильным выразить сопротивление в зависимости от параметра $\frac{\Delta u_*}{v}$, определяющим граничные условия на стенке трубы. Это приводит к выражению типа (1), причём в результате обработки опытов получено

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} - 2 \lg \frac{r}{\Delta} = 0,7 + 2 \lg \frac{\frac{\Delta u_*}{v}}{a + m \frac{\Delta u_*}{v}}. \quad (15)$$

Помимо абсолютной шероховатости Δ в формулу входят два безразмерных коэффициента a и m , отличающиеся друг от друга при разных шероховатостях.

При установлении аналитического выражения (15) автор исходил из соображения, что желательно установить чёткие пределы доквадратичной области. Эти пределы определяются решением уравнения (15) с (4) и (5).

Начало доквадратичной области получается в виде равенства

$$\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_0 = \frac{1-a}{m}, \quad (16)$$

и начало квадратичной области в виде

$$\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_1 = \frac{a}{m-1}. \quad (17)$$

Отрицательные значения $\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_0$ в таблице 2 не имеют физического смысла. Они получаются в результате экстраполяции формулы (15) в ламинарную область, где эта формула не действительна. Поэтому, отрицательные значения $\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_0$ указывают лишь на отсутствие области гладкой трубы.

Критерием перехода потока от ламинарного режима к турбулентному является число Рейнольдса, причём в литературе обычно даётся критическое число $Re = 2320$. В действительности же, как показывают многие опыты (в том числе опыты И. Никурадзе³ и Ф. А. Шевелева⁷), существует переходная область, находящаяся в пределах $Re = 2200—4500$. Поэтому все формулы турбулентного сопротивления, также и формулы, предлагаемые в настоящей работе, действительные при $Re > 4500$.

Необходимо также отметить, что согласно литературным источникам (напр. ТУиН¹⁶) определение коэффициента сопротивления в докватратичной области рекомендуется часто путём введения дополнительного коэффициента ψ по выражению

$$\lambda = \psi \lambda_0, \quad (18)$$

где λ_0 соответствует новым или гладким трубам. Пользуясь формулой (15), такой поправочный коэффициент становится излишним. Предлагаемые значения коэффициентов a и m , также и абсолютной шероховатости Δ , учитывают все факторы, обуславливающие сопротивление, т. е. помимо микроструктуры шероховатости учтено влияние стыков, условия укладки труб и т. д.

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ РАСЧЁТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Расчеты в квадратичной области проводятся по формуле (5), которую можно переписать в виде

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{KB}}} = 0,7 - 2\lg(2\Delta) + 2\lg D = A_1 + 2\lg D, \quad (19)$$

где D — в см.

В нижеследующей таблице 2 приводятся значения всех коэффициентов и характерных величин для водопроводных труб.

Таблица 2

Наименование труб	Δ мм	a	m	$\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_0$	$\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_1$	A ₁
Новые стальные (без стыков)	0,03	0,72	0,83	0,387	4,23	5,14
Стальные в эксплуатации	0,45	5,1	0,71	-5,77	17,59	2,79
Новые чугунные (нормальной длины)	0,1	7,1	0,6	-10,17	17,75	4,10
Чугунные в эксплуатации	0,45	11,0	0,51	-19,61	22,45	2,79
Новые асбестоцементные	0,012	0,75	0,77	0,325	3,26	5,94

Величины таблицы 2 получены на основании обработки опытов Ф. А. Шевелева^{7,8}, являющимися наиболее полными в области изучения сопротивления водопроводных труб. Коэффициенты новых труб определены как средние значения для всех труб данной категории. Следует отметить, что шероховатость стальных труб увеличивается не только в ходе эксплуатации, но и вследствие коррозии при хранении на складе⁶. Поэтому понятие «новой» трубы имеет несколько условный характер.

Известно, что в ходе эксплуатации шероховатость увеличивается в первые годы службы сравнительно быстро, а затем медленно. Из работы Ф. А. Шевелева⁷ видно, что стальные трубы со сроком эксплуатации свыше 10 лет имеют эквивалентную шероховатость $k_9 = 1,5-1,51$ мм, чему соответствует $\Delta = 0,45$ мм. Эта величина, как максимальная в 15-летнем периоде, взята нами за основу.

Эквивалентная шероховатость чугунных труб, бывших в эксплуатации от 6 до 9 лет, находится в пределах 1,34 — 1,44 мм. Из-за недостатка данных для более длительного периода службы, принимаем $\Delta = 0,45$ мм (т. е. $k_9 = 1,5$ мм), как для стальных труб.

Добавим, что формула (5) является по существу идентичной с формулой И. И. Агроскина¹⁷

$$C = 17,72(K + \lg R). \quad (20)$$

Значению $\Delta = 0,45$ мм отвечает $K = 4,0$ в формуле (20), что совпадает с рекомендациями И. И. Агроскина для нормальных стальных и чугунных труб.

Увеличение шероховатости происходит за счёт коррозии и отложений. Образование отложений, в свою очередь, за-

висит от химических и физических свойств воды. В дери-
вационных трубопроводах ГЭС наблюдаются отложения
иного характера, вследствие действия железобактерий,
причём в отдельных случаях шероховатость во много раз
превышает шероховатость трубопроводов очищенной
воды¹⁸. В эксплуатации газопроводов наблюдаются отло-
жения из смолы и нафталина, образующие своеобразную
шероховатость¹⁹. Вопрос о шероховатости трубопроводов
требует еще дополнительного изучения, причём следует
обращать внимание не только на материал труб и на срок
службы, но также и на конкретные условия образования
шероховатости. Поэтому коэффициенты таблицы 2 для
труб в эксплуатации, а также и нижеследующие таблицы
и графики, рекомендуются только для расчёта хозяйствен-
но-питьевых водопроводов, в соответствии с опытными
данными, взятыми за основу. При проектировании паропроводов и воздухопроводов следует отдать предпочтение
рекомендациям Г. А. Мурина⁶, исследовавшего вышеука-
занные трубопроводы.

При гидравлическом расчёте водопроводных труб и се-
тей удобно пользоваться понятиями расходной характе-
ристики K и удельного сопротивления A , согласно фор-
мулам

$$Q = K\sqrt{i}, \quad (21)$$

и

$$i = AQ^2,$$

причём

$$A = \frac{1}{K^2}. \quad (22)$$

Для упрощения расчетов нами составлены таблицы
расходных характеристик и удельных сопротивлений для
стальных и чугунных труб в условиях эксплуатации (см.
приложения). Таблицы составлены на основе формулы
(19) с $A_1=2,79$ и действительны в квадратичной области
сопротивления.

По примеру существующих таблиц¹¹, для труб с диа-
метром менее 300 мм учтено уменьшение внутреннего
диаметра на 1 мм.

Внутренние диаметры стальных труб малого диаметра
взяты по ГОСТ 3262-55, причём таблицы составлены как
для нормальной, так и для укупнённой толщины стенок.

Для стальных труб средних и больших диаметров внутренние диаметры приняты по ГОСТ 3101-46 и 4015-52, с учётом разной толщины стенок.

Диаметры чугунных труб взяты по ГОСТ 5525-50.

Сопротивление в доквadraticной области определяется формулой (15), которую можно представить в виде

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_{\text{кв}}}} + 2 \lg \frac{\frac{\Delta u_*}{v}}{a + m \frac{\Delta u_*}{v}} \quad (23)$$

Увеличение сопротивления в доквadraticной области можно учесть в виде

$$\lambda = \varphi \lambda_{\text{кв}}, \quad (24)$$

причём поправочный коэффициент φ определяется по (23):

$$\frac{1}{\sqrt{\varphi}} = 1 + \sqrt{\lambda_{\text{кв}}} \cdot 2 \lg \frac{\frac{\Delta u_*}{v}}{a + m \frac{\Delta u_*}{v}} \quad (25)$$

Удельное сопротивление увеличивается в доквadraticной области, согласно (22)

$$A = \varphi A_{\text{кв}}; \quad (26)$$

расходная характеристика уменьшается соответственно в виде

$$K = \frac{K_{\text{кв}}}{\sqrt{\varphi}}, \quad (27)$$

причём $A_{\text{кв}}$ и $K_{\text{кв}}$ принимаются по таблицам.

Для определения φ нами составлены графики 1—6 (приложения). Имея в виду, что коэффициенты a и m , согласно таблице 2, не одинаковы для стальных и чугунных труб, графики составлены отдельно для стальных (графики 1—4) и для чугунных (графики 5 и 6) труб. Кроме того, чтобы охватить весь диапазон стальных труб, составлены отдельные графики для труб малого (1 и 2), также и для среднего и большого (3 и 4) диаметров. Диаметры на графиках являются внутренними диаметрами труб; на графиках 1, 2, 5 и 6 показаны стандартные диаметры по ГОСТ; при этом на графиках 1 и 2 пунктирные прямые отвечают усиленным трубам. Для труб среднего и большого диаметра (графики 3 и 4) стандартные диаметры

не показаны вследствие огромного количества возможных диаметров.

При составлении графиков принято $v=0,013$ см²/сек., что соответствует температуре воды $t=10^\circ$.

Как видно из (25), для трубы определённого диаметра коэффициент ϕ зависит только от динамической скорости u_* . Динамическую скорость можно определить по уклону

$$u_* = \sqrt{gRi}$$

или, по средней скорости

$$u_* = V \sqrt{\frac{\lambda}{8}}$$

Для удобства расчётов нами составлены 2 группы графиков, где ϕ определяется в системе координат i, D (графики 1, 3 и 5) и в системе координат V, D (графики 2, 4 и 6).

Прямые $\phi=1,0$ на графиках определяют значения уклонов и скоростей, соответствующих началу квадратичной области. Если расчётная точка попадает в область, расположенную выше прямой $\phi=1,0$, то это значит, что расчёты следует проводить непосредственно по таблицам, без поправочного коэффициента.

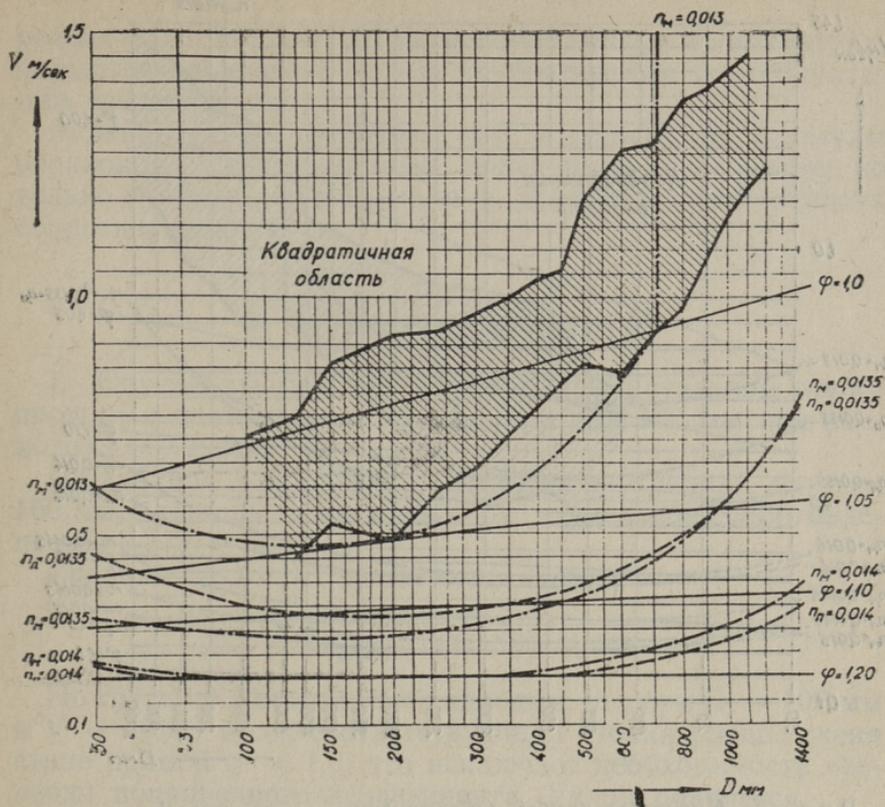
Кроме того, на графиках 1 и 2 указана кривая $Re=4500$, ограничивающая область применения таблиц и графиков.

Пользование таблицами и графиками выясняется на примерах расчёта.

Несомненный интерес представляет вопрос о том, в какой области работают различные трубопроводы, так как расчеты в доквадратичной области в некоторой мере осложняются.

Анализ показывает, что новые трубы, стальные, чугунные и асбестоцементные, работают практически всегда в доквадратичной области. Иначе обстоит дело с трубами в эксплуатации. По Ф. А. Шевелеву¹¹ доквадратичная область для стальных и чугунных трубопроводов при температуре воды 10° имеет место всегда при $V < 1,2$ м/сек. В действительности же эта предельная скорость возрастает с диаметром труб, точно так же, как и рекомендуемые экономические скорости.

На рис. 1 воспроизведен частично график 4 для стальных труб в эксплуатации, там же показаны рекомендуемые скорости согласно литературным данным²⁰ (заштри-



Р и с. 1. Стальные трубы. Область допустимых скоростей заштрихована. p_n — коэффициенты шероховатости по Н. Н. Павловскому, p_m — по Маннингу.

хованная область). Как видно, значительная часть допустимых скоростей находится в квадратичной области. В остальной части величина поправочного коэффициента не превышает 1,05. Менее благоприятны с этой точки зрения чугунные трубы в эксплуатации (рис. 2), при расчете которых поправка на доквадратичность доходит в отдельных случаях до 15%.

В предварительных расчетах длинных трубопроводов, также и водопроводных сетей, можно рекомендовать пользоваться предложенными нами расчетными таблицами без введения поправочного коэффициента.

Следует добавить, что в последнее время короткие трубопроводы выполняются преимущественно стальными со сварными соединениями и скорости принимаются выше скоростей в длинных трубопроводах. При расчете корот-

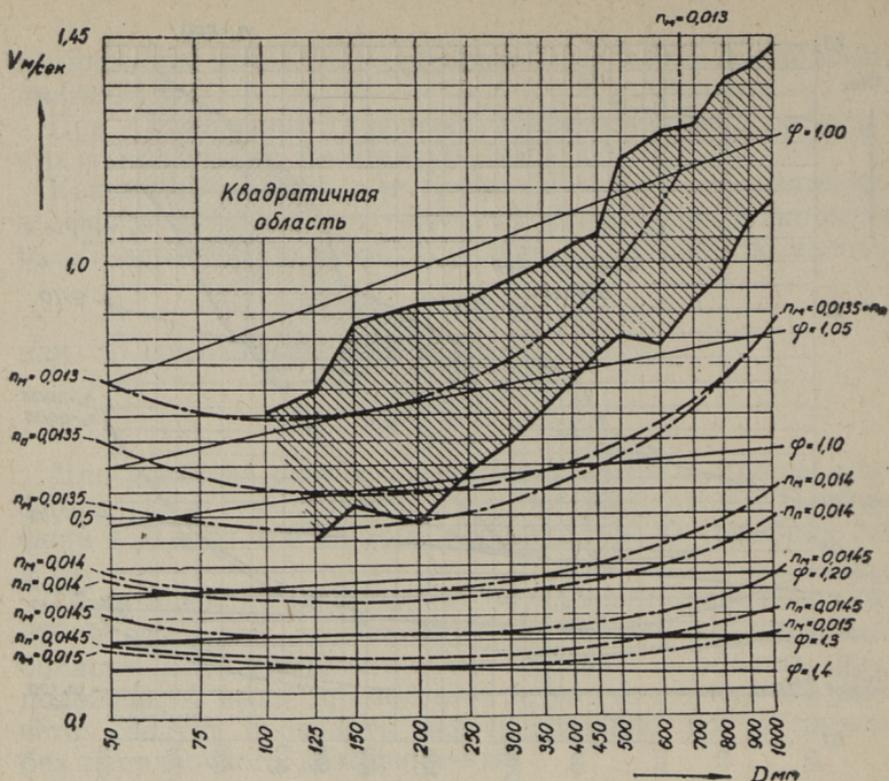


Рис. 2. Чугунные трубы. Обозначения — см. рис. 1.

ких трубопроводов можно также отказаться от поправочного коэффициента, так как потери напора за счет местных сопротивлений определяются с меньшей точностью, чем потери на трение.

В заключение следует остановиться на еще одном вопросе, представляющем практический интерес. В течение многих лет мы пользовались при расчете трубопроводов эмпирическими формулами: формулой Н. Н. Павловского (8) с показателем степени:

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,10),$$

и формулой Маннинга с $y = 1/6$. На рис. 1 и 2 показаны линии равных коэффициентов шероховатости. Как видно, неплохое совпадение получается в квадратичной и в докватратичной областях, в зоне рекомендуемых скоростей, при $n_{\Pi} = n_M = 0,13$. Из этого следует, что коэффициенты ше-

роховатости 0,012 и 0,0125, рекомендуемые в литературе, являются заниженными для трубопроводов в эксплуатации свыше 10 лет.

Можно также заключить, что эмпирические формулы отражают опытные данные, полученные повидимому не только в квадратичной, но и в доквадратичной области сопротивления.

3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

1. Определить гидравлический уклон в стальном трубопроводе с диаметром условного прохода 100 мм при расходе $Q = 7$ л/сек.

По таблице 1 приложения находим внутренний диаметр 160 мм, площадь сечения $86,59 \text{ см}^2$ и удельное сопротивление $A = 277$.

Средняя скорость определяется как

$$V = \frac{0,007}{0,008659} = 0,808 \text{ м/сек.}$$

По графику 2 приложения находим, что при $D = 106$ мм и $V = 0,808$ м/сек соответствующая точка расположена выше прямой $\varphi = 1,0$, что исключает необходимость введения поправочного коэффициента. Уклон равняется

$$i = 277 \cdot 0,007^2 = 0,0136.$$

2. Определить гидравлический уклон в стальном трубопроводе с наружным диаметром 219 мм и толщиной стенок 10 мм при расходе $Q = 14,8$ л/сек.

По таблице 2 находим внутренний диаметр 199 мм, площадь сечения $0,03079 \text{ м}^2$ и $A = 9,36$.

Определяем среднюю скорость

$$V = \frac{0,0148}{0,03079} = 0,481 \text{ м/сек.}$$

По графику 4 находим для $D = 199$ мм и $V = 0,481$ м/сек $\varphi = 1,05$.

Уклон равняется

$$i = 1,05 \cdot 9,36 \cdot 0,0148^2 = 0,00215.$$

3. Определить уклон в чугунном трубопроводе с внутренним диаметром 200 мм и при расходе $Q = 14,8$ л/сек (условия близки к условиям примера 2).

По таблице 4 находим площадь сечения $0,03110 \text{ м}^2$ и $A=9,11$.

Далее

$$V = \frac{0,0148}{0,03110} = 0,476 \text{ м/сек.}$$

Согласно графику 6 $\varphi = 1,14$.

Уклон равняется

$$i = 1,14 \cdot 9,11 \cdot 0,0148^2 = 0,00227.$$

4. Определить уклон в стальном трубопроводе с диаметром условного прохода 500 мм и толщиной стенок 12 мм при расходе $0,180 \text{ м}^3/\text{сек}$.

По таблице 3 находим внутренний диаметр 505 мм, площадь сечения $0,2003 \text{ м}^2$ и $A=0,0654$.

Получаем скорость

$$V = \frac{0,180}{0,2003} = 0,90 \text{ м/сек.}$$

Из графика 4 видно, что поправочный коэффициент вводить не следует и гидравлический уклон определяется как

$$i = 0,0654 \cdot 0,18^2 = 0,00212.$$

5. Определить уклон в чугунном трубопроводе с внутренним диаметром 500 мм при расходе $Q=0,180 \text{ м}^3/\text{сек}$ (условия близки к условиям примера 4).

По таблице 4 получаем площадь сечения $0,1963 \text{ м}^2$ и $A=0,0690$.

Получаем скорость

$$V = \frac{0,180}{0,1963} = 0,917 \text{ м/сек.}$$

Согласно графику 6 поправочный коэффициент равен $\varphi=1,03$. Уклон определяется как

$$i = 1,03 \cdot 0,069 \cdot 0,18^2 = 0,00230.$$

6. Определить пропускную способность стального трубопровода с диаметром условного прохода 100 мм при гидравлическом уклоне $i=0,0136$ (см. пример 1).

По таблице 1 находим внутренний диаметр 106 мм и расходную характеристику $K=0,0601$.

Из графика 1 видно, что при $D=106$ мм и $i=0,0136$ соответствующая точка находится выше прямой $\varphi=1,0$.

Поэтому поправочный коэффициент вводить не следует. Расход определяется непосредственно как

$$Q = 0,0601 \sqrt{0,0136} = 0,007 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

7. Определить пропускную способность чугунного трубопровода с внутренним диаметром 200 мм при уклоне $i=0,00227$ (см. пример 3).

Из таблицы 4 получаем $K=0,331$. По графику 5 находим для $D=200$ мм и $i=0,00227$, $\varphi=1,14$.

Пропускная способность определяется как

$$Q = \frac{0,331}{\sqrt{1,14}} \cdot \sqrt{0,00227} = 0,0148 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

8. Определить диаметр стального трубопровода при расходе $Q=15$ л/сек и гидравлическом уклоне $i=0,01$.

Находим расходную характеристику

$$K = \frac{Q}{\sqrt{i}} = \frac{0,015}{\sqrt{0,01}} = 0,15.$$

Подходящей является труба с внутренним диаметром 156 мм (диаметр условного прохода 150 мм), имеющая расходную характеристику $K=0,170$ (таблица 1).

Из графика 1 видно, что вводить поправочный коэффициент не требуется; полученный диаметр является окончательным.

9. Определить диаметр стального трубопровода при расходе $Q=0,05$ м³/сек и уклоне $i=0,0026$.

Находим расходную характеристику

$$K = \frac{0,05}{\sqrt{0,0026}} = 0,981.$$

Согласно данным таблицы 2, подходящей является труба с наружным диаметром 325 мм. Если принять толщину стенки 10 мм, то внутренний диаметр будет 305 мм и $K=1,03$.

По графику 3 определяем $\varphi=1,015$. Так как $\varphi > 1,0$, требуется произвести поверочный расчет

$$Q = \frac{1,03}{\sqrt{1,015}} \cdot \sqrt{0,0026} = 0,0521 > 0,05 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

т. е. принятый диаметр удовлетворяет.

10. В условиях примера 9 определить диаметр чугунного трубопровода.

Согласно таблице 4 наиболее близкой является расход-

ная характеристика трубы с внутренним диаметром 300 мм: $K=0,985 > 0,981$.

Из графика 5 находим $\varphi=1,07$. Поверочный расчет

$$Q = \frac{0,985}{\sqrt{1,07}} \cdot \sqrt{0,0026} = 0,0486 < 0,05 \text{ м}^3/\text{сек}$$

показывает, что вследствие увеличения сопротивления в доквадратичной области принятый диаметр не обеспечивает выполнения поставленных условий. Следует принять $D=350$ мм.

4. ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблицы расходных характеристик K и удельных сопротивлений A (определяемых по формулам (21) и (22); расход Q — в м³/сек) для стандартных стальных и чугунных труб в условиях эксплуатации и графики поправочных коэффициентов.

1. Стальные трубы (водогазопроводные) по ГОСТ 3262-55

Диаметр условного прохода мм	Диаметр прохода дюйм	Наружный диаметр мм	Обыкновенные трубы						Усиленные трубы					
			Толщина стенки мм	Внутренний диаметр мм	Расчетный диаметр мм	Расчетная площадь сечения см ²	$K \cdot 10^3$	$A \cdot 10^{-3}$	Толщина стенки мм	Внутренний диаметр мм	Расчетный диаметр мм	Расчетная площадь сечения см ²	$K \cdot 10^3$	$A \cdot 10^{-3}$
8	1/4	13,5	2,25	9	8	0,5027	0,0517	374000	2,75	8	7	0,3848	0,0354	798000
10	3/8	17	2,25	12,5	11,5	1,039	0,144	48400	2,75	11,5	10,5	0,8659	0,111	80600
15	1/2	21,25	2,75	15,75	14,75	1,709	0,288	12100	3,25	14,75	13,75	1,485	0,237	17900
20	3/4	26,75	2,75	21,25	20,25	3,221	0,691	2490	3,5	19,75	18,75	2,761	0,559	3200
25	1	33,5	3,25	27	26	5,309	1,37	530	4	25,5	24,5	4,714	1,17	734
32	1 1/4	42,25	3,25	35,75	34,75	9,484	3,03	109	4	31,25	33,25	8,683	2,69	138
40	1 1/2	48	3,5	41	40	12,57	4,45	50,5	4,25	39,5	38,5	11,64	4,01	62,2
50	2	60	3,5	53	52	21,24	9,06	12,2	4,5	51	50	19,63	8,15	15,1
70	2 1/2	75,5	3,75	68	67	35,26	18,0	3,10	4,5	66,5	65,5	33,70	16,9	3,50
80	3	88,5	4	80,5	79,5	49,64	28,5	1,23	4,75	79	78	47,78	27,0	1,37
100	4	114	4	106	105	86,59	60,1	0,277	5	104	103	83,32	57,1	0,307
125	5	140	4,5	131	130	132,7	106	0,0883	5,5	129	128	128,7	102	0,0959
150	6	165	4,5	156	155	188,7	170	0,0345	5,5	154	153	183,9	164	0,0370

2. Стальные трубы (нефте-водо-газопроводные) по ГОСТ-3101-46

Наружный диаметр мм	Толщина стенки мм	Внутренний диаметр мм	Расчетный внутренний диаметр мм	Расчетная площадь сечения м ²	К	А
1	2	3	4	5	6	7
146	5	136	135	0,01431	0,118	72,2
	6	134	133	0,01389	0,113	78,2
	7	132	131	0,01348	0,109	84,8
	8	130	129	0,01307	0,104	92,0
	9	128	127	0,01267	0,100	100,0
168	5	158	157	0,01936	0,176	32,2
	6	156	155	0,01887	0,170	34,5
	7	154	153	0,01839	0,164	37,0
	8	152	151	0,01791	0,159	39,7
	9	150	149	0,01744	0,153	42,6
194	6	182	181	0,02573	0,257	15,1
	7	180	179	0,02516	0,250	16,0
	8	178	177	0,02461	0,242	17,0
	9	176	175	0,02405	0,235	18,1
	10	174	173	0,02351	0,228	19,2
219	6	207	206	0,03333	0,363	7,58
	7	205	204	0,03269	0,354	7,98
	8	203	202	0,03205	0,345	8,42
	9	201	200	0,03142	0,336	8,87
	10	199	198	0,03079	0,327	9,36
	11	197	196	0,03017	0,318	9,88
245	7	231	230	0,04155	0,487	4,22
	8	229	228	0,04083	0,476	4,42
	9	227	226	0,04011	0,465	4,63
	10	225	224	0,03941	0,454	4,86
	11	223	222	0,03871	0,443	5,09
273	7	259	258	0,05228	0,660	2,29
	8	257	256	0,05147	0,647	2,39
	9	255	254	0,05067	0,634	2,49
	10	253	252	0,04988	0,620	2,60
	11	251	250	0,04909	0,608	2,71
	12	249	248	0,04831	0,595	2,83
299	8	283	282	0,06246	0,836	1,43
	9	281	280	0,06158	0,821	1,48
	10	279	278	0,06070	0,805	1,54
	11	277	276	0,05983	0,790	1,60
	12	275	274	0,05896	0,775	1,67

1	2	3	4	5	6	7
325	8	309	309	0,07499	1,07	0,880
	9	307	307	0,07402	1,05	0,912
	10	305	305	0,07306	1,03	0,944
	11	303	303	0,07211	1,01	0,977
	12	301	301	0,07116	0,994	1,01
351	8	335	335	0,08814	1,32	0,574
	9	333	333	0,08709	1,30	0,592
	10	331	331	0,08605	1,28	0,612
	11	329	329	0,08501	1,26	0,631
	12	327	327	0,08398	1,24	0,652
377	10	357	357	0,1001	1,56	0,410
	11	355	355	0,09898	1,54	0,422
	12	353	353	0,09787	1,52	0,435
426	11	404	404	0,1282	2,17	0,213
	12	402	402	0,1269	2,14	0,219

3. Стальные трубы (электросварные) по ГОСТ 4015-52

Диаметр условно- го про- хода мм	Наруж- ный диа- метр мм	Толщина стенки мм	Внут- ренний диаметр мм	Площадь сечения м ²	К	А
1	2	3	4	5	6	7
400	426	7	412	0,1333	2,28	0,192
		8	410	0,1320	2,25	0,197
		9	408	0,1307	2,22	0,202
		10	406	0,1295	2,20	0,208
		11	404	0,1282	2,17	0,213
		12	402	0,1269	2,14	0,219
450	478	7	464	0,1691	3,12	0,102
		8	462	0,1676	3,09	0,105
		9	460	0,1662	3,05	0,107
		10	458	0,1647	3,02	0,110
		11	456	0,1633	2,98	0,112
		12	454	0,1619	2,95	0,115
500	529	8	513	0,2067	4,07	0,0603
		9	511	0,2051	4,03	0,0615
		10	509	0,2035	3,99	0,0628
		11	507	0,2019	3,95	0,0641
		12	505	0,2003	3,91	0,0654

1	2	3	4	5	6	7
600	630	8	614	0,2961	6,54	0,0233
		9	612	0,2942	6,49	0,0237
		10	610	0,2922	6,43	0,0242
		11	608	0,2903	6,38	0,0246
		12	606	0,2884	6,32	0,0250
700	720	9	702	0,3870	9,31	0,0115
		10	700	0,3848	9,24	0,0117
		11	698	0,3826	9,18	0,0119
		12	696	0,3805	9,11	0,0121
800	820	9	802	0,5052	13,2	0,00572
		10	800	0,5027	13,1	0,00579
		11	798	0,5001	13,1	0,00587
		12	796	0,4976	13,0	0,00595
		13	794	0,4951	12,9	0,00603
		14	792	0,4927	12,8	0,00611
900	920	9	902	0,6390	18,0	0,00308
		10	900	0,6362	17,9	0,00312
		11	898	0,6333	17,8	0,00315
		12	896	0,6305	17,7	0,00319
		13	894	0,6277	17,6	0,00323
		14	892	0,6249	17,5	0,00327
1000	1020	9	1002	0,7885	23,8	0,00177
		10	1000	0,7854	23,6	0,00179
		11	998	0,7823	23,5	0,00181
		12	996	0,7791	23,4	0,00183
		13	994	0,7760	23,3	0,00185
		14	992	0,7729	23,1	0,00187
1100	1120	10	1100	0,9503	30,4	0,00109
		11	1098	0,9469	30,2	0,00110
		12	1096	0,9434	30,1	0,00111
		13	1094	0,9400	29,9	0,00112
		14	1092	0,9366	29,8	0,00113
1200	1220	10	1200	1,131	38,1	0,000687
		11	1198	1,127	38,0	0,000694
		12	1196	1,123	37,8	0,000700
		13	1194	1,120	37,6	0,000706
		14	1192	1,116	37,5	0,000712
1300	1320	10	1300	1,327	47,1	0,000452
		11	1298	1,323	46,9	0,000455
		12	1296	1,319	46,7	0,000459
		13	1294	1,315	46,5	0,000463
		14	1292	1,311	46,3	0,000466
1400	1420	11	1398	1,535	56,9	0,000308
		12	1396	1,531	56,7	0,000311
		13	1394	1,526	56,5	0,000313
		14	1392	1,522	56,3	0,000315

4. Чугунные водопроводные трубы по ГОСТ 5525-50

Внутренний диаметр мм	Расчетный внутренний диаметр мм	Расчетная площадь сечения м ²	К	А
50	49	0,001886	0,00771	16800
75	74	0,004301	0,0235	1810
100	99	0,007698	0,0513	380
125	124	0,10208	0,0938	114
150	149	0,01744	0,153	42,6
200	199	0,03110	0,331	9,11
250	249	0,04870	0,601	2,77
300	300	0,07069	0,985	1,03
350	350	0,09621	1,48	0,455
400	400	0,1257	2,11	0,225
450	450	0,1590	2,88	0,120
500	500	0,1963	3,81	0,0690
600	600	0,2827	6,16	0,0264
700	700	0,3848	9,24	0,0117
800	800	0,5027	13,1	0,00579
900	900	0,6362	17,9	0,00312
1000	1000	0,7854	23,6	0,00179

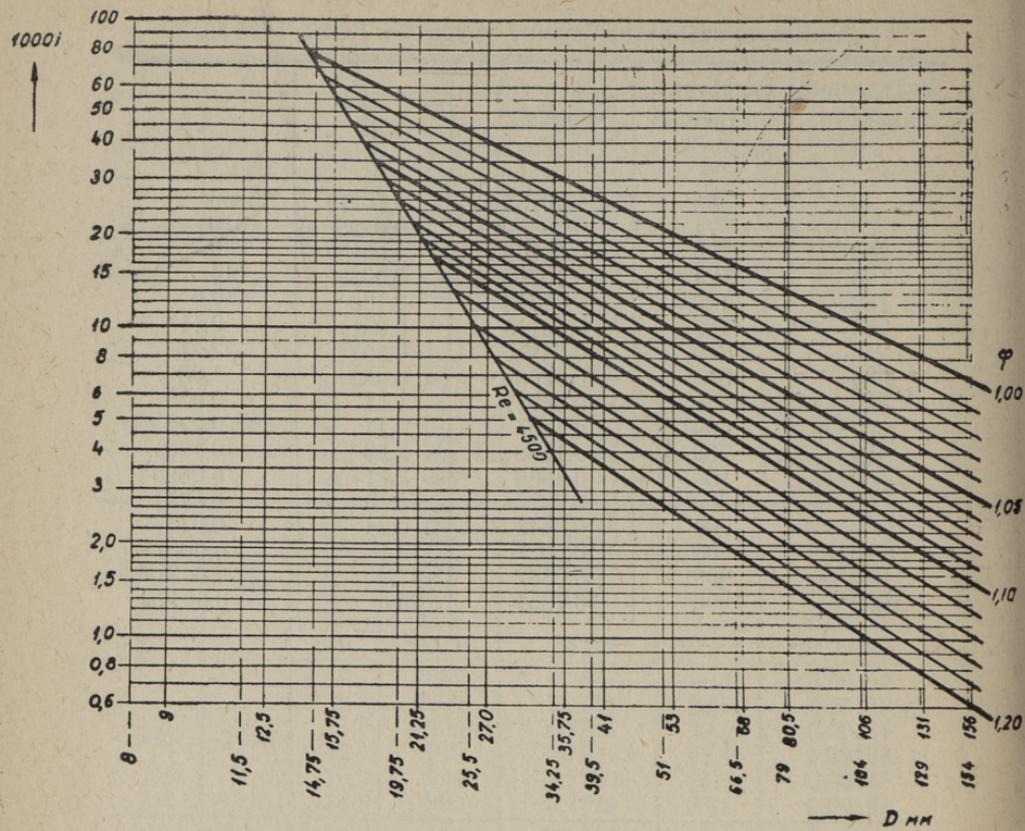


График 1. Поправочные коэффициенты для стальных труб малого диаметра по ГОСТ 3265-55. Пунктирные линии соответствуют внутренним диаметрам усиленных труб.

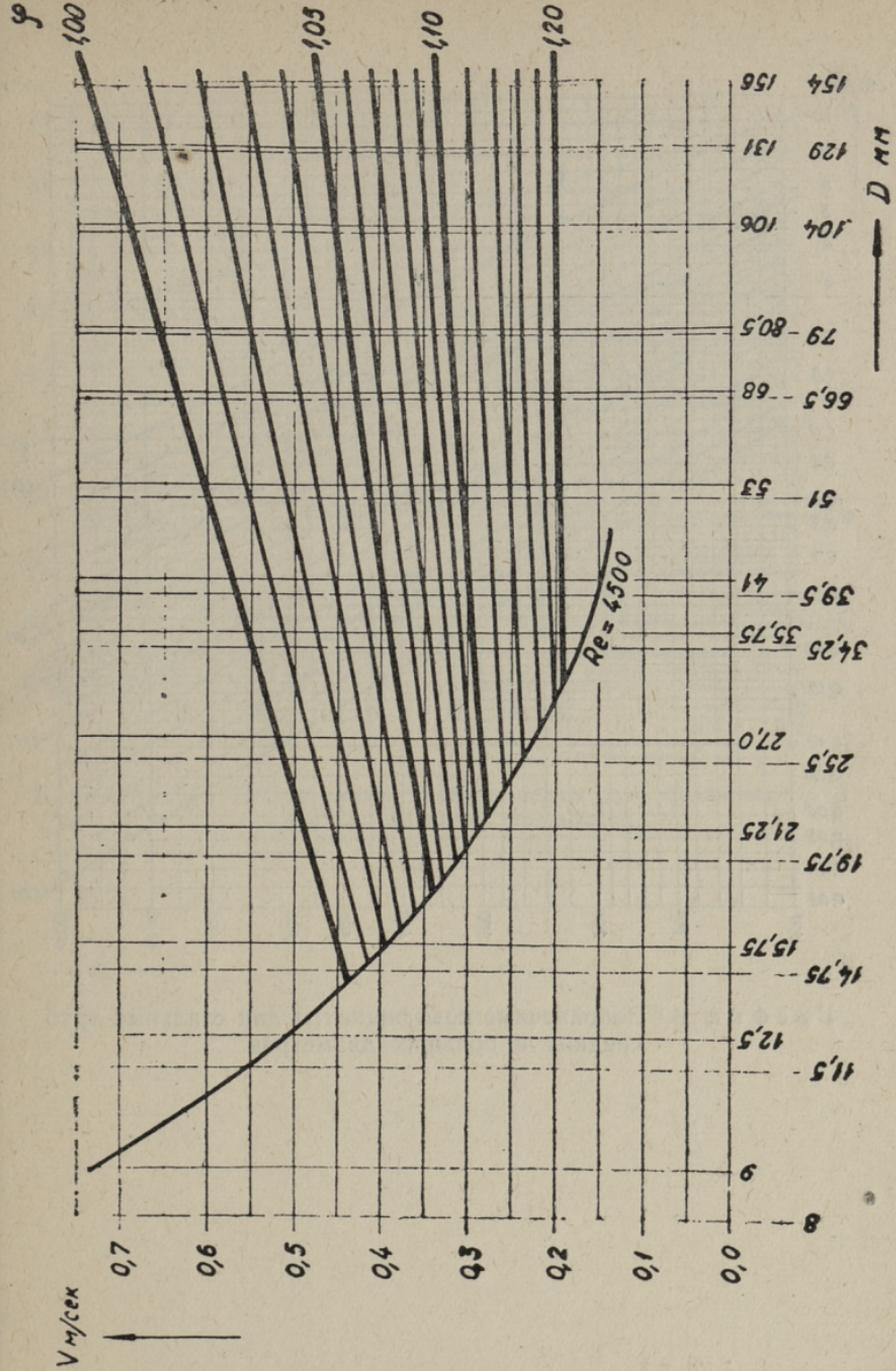


График 2. Поправочные коэффициенты для стальных труб малого диаметра по ГОСТ 3265-55. Пунктирные линии соответствуют внутренним диаметрам усиленных труб.

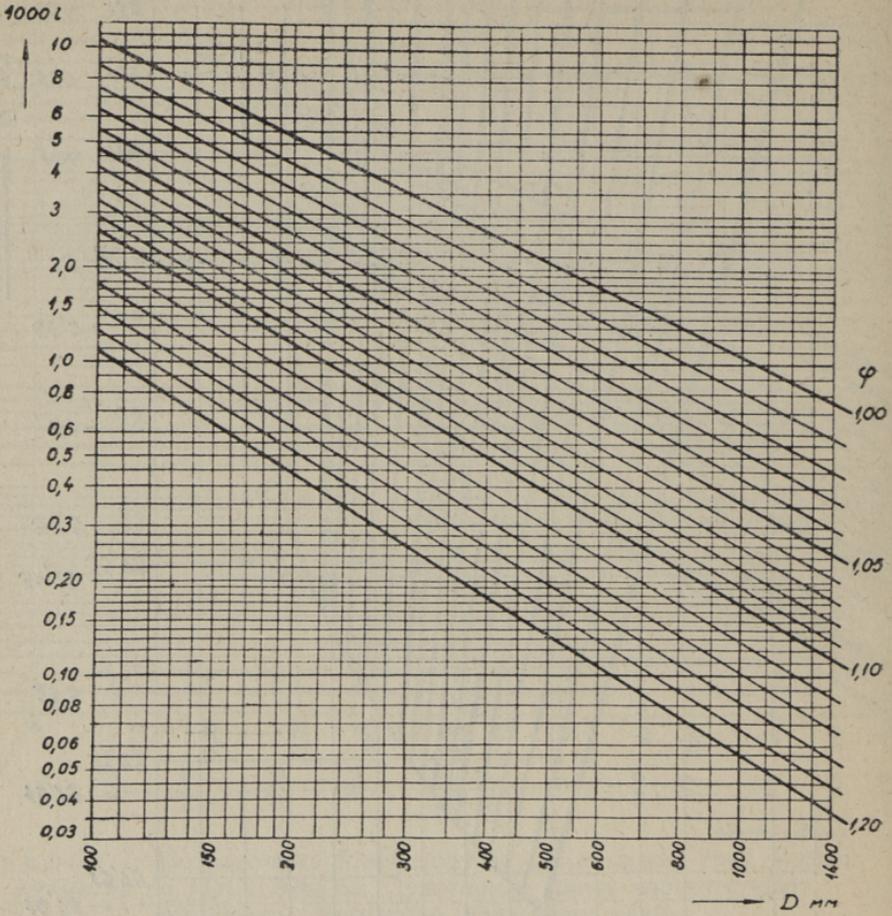


График 3. Поправочные коэффициенты для стальных труб средних и больших диаметров.

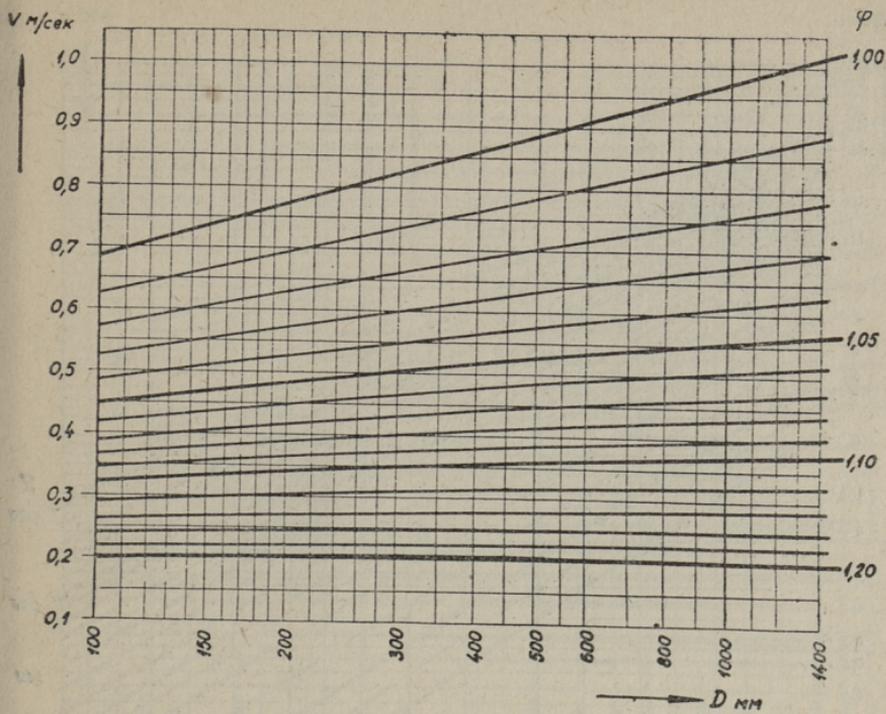


График 4. Поправочные коэффициенты для стальных труб средних и больших диаметров.

1000 i

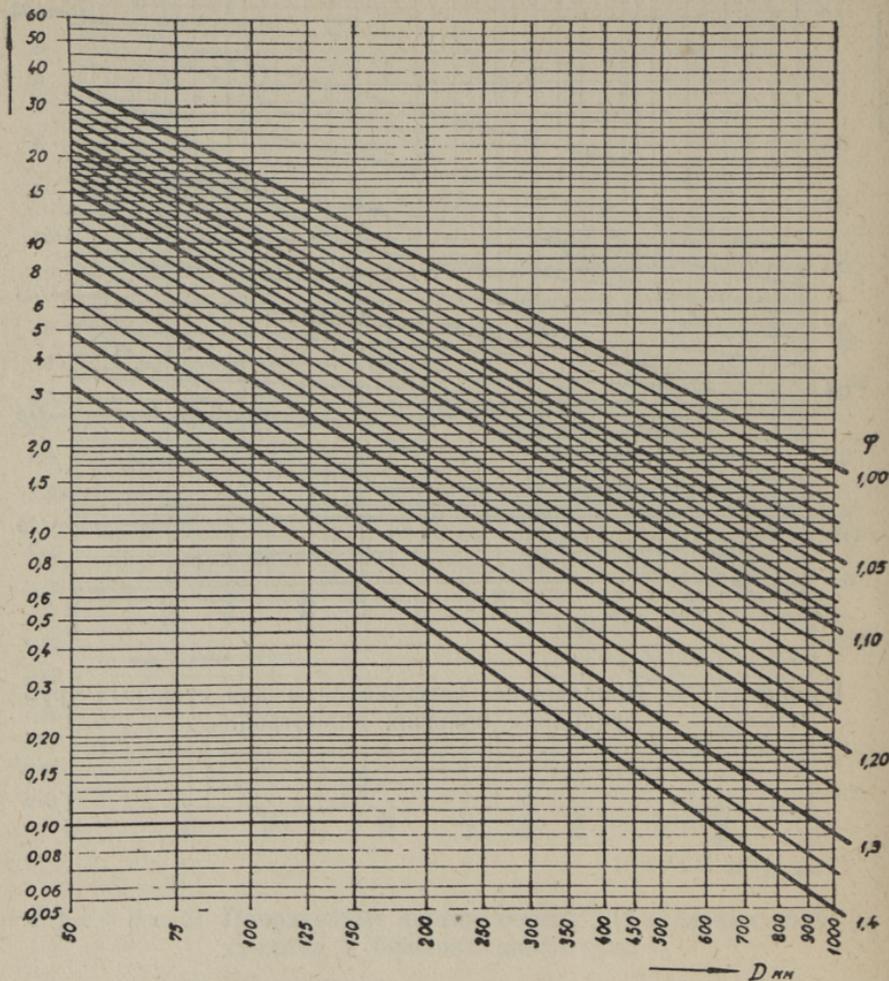


График 5. Поправочные коэффициенты для чугунных труб по ГОСТ 5525-50.

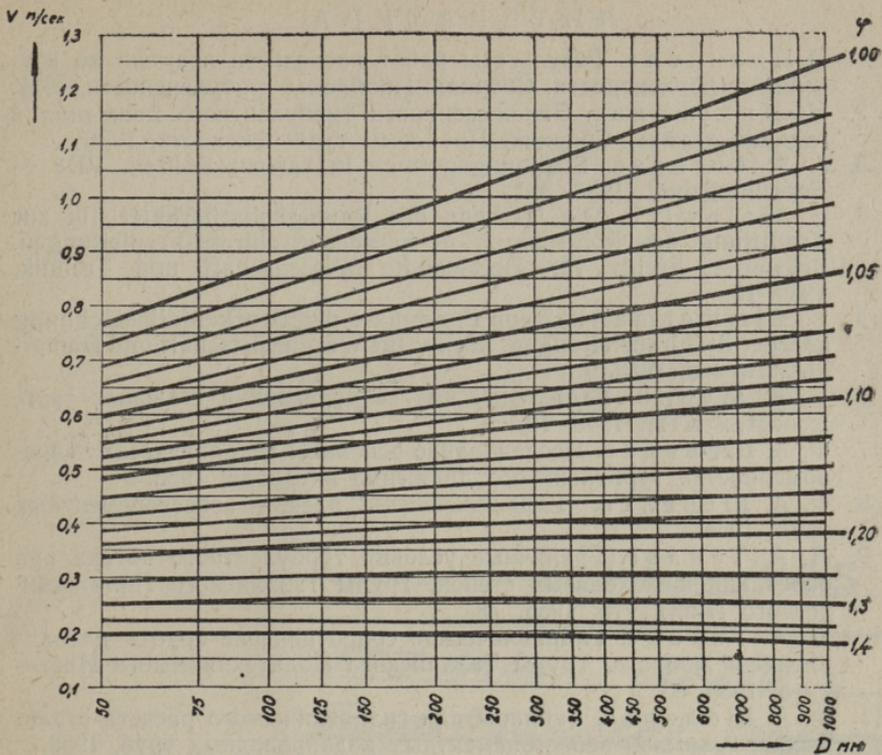
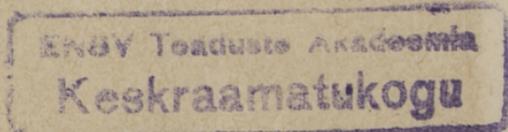


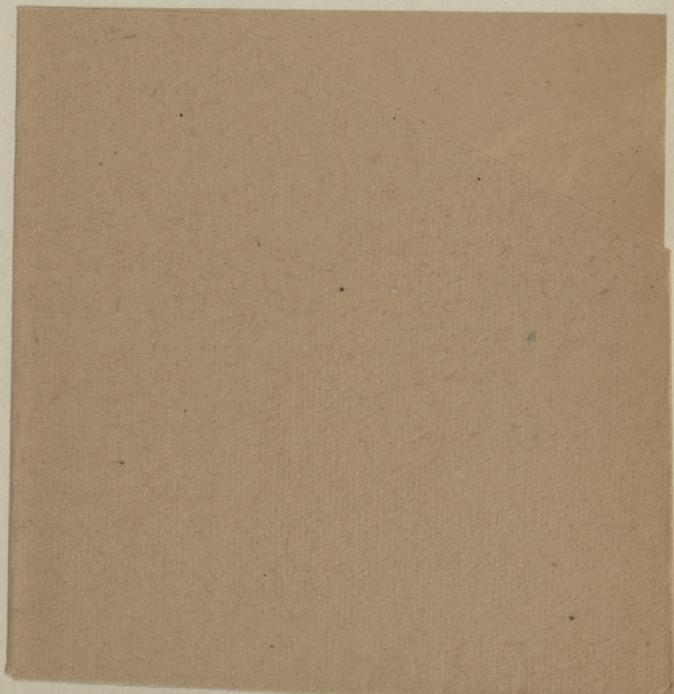
График 6. Поправочные коэффициенты для чугунных труб по ГОСТ 5525-50.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Л. Прандтль. Результаты работ последнего времени по изучению турбулентности. Сборник, Проблемы турбулентности, 1936.
2. И. Никурадзе. Закономерности турбулентного движения в гладких трубах. Сборник, Проблемы турбулентности, 1936.
3. J. Nikuradse. Strömungsgesetze in rauhen Röhren. VDI — Forschungsheft, 1933, 361.
4. F. Galawics. Die Methode der Rauigkeitscharakteristik zur Ermittlung der Rohrreibung in gerader Stahlrohr-Fernleitungen. Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, 1939, 12.
5. E. Zimmermann. Neue Ergebnisse der Druckabfallberechnung gerader Stahlrohrleitungen. Archiv für Wärmewirtschaft und Dampfkesselwesen, 1940, 6.
6. Г. А. Мури н. Гидравлическое сопротивление стальных труб, Известия ВТИ, 1948, 10.
7. Ф. А. Шевелев. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах, 1953.
8. Ф. А. Шевелев. Гидравлический расчёт асбестоцементных труб, 1954.
9. Л. А. Тепакс. Граничные условия турбулентного потока при обтекании шероховатых стенок, Труды Таллинского Политехнического Института, 1956, 78.
10. Л. А. Тепакс. Гидравлическое сопротивление труб в доквадратичной области, Труды Таллинского Политехнического Института, 1956, 83.
11. Ф. А. Шевелев. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных и асбестоцементных водопроводных труб, 1956.
12. C. F. Colebrook. Turbulent Flow in Pipes with Particular Reference to the Transition Region between the Smooth and Rough Pipe Laws, Journal Inst. Civil Engineers, 1938—39, 4.
13. А. Д. Альтш уль. Закон сопротивления трубопроводов, ДАН СССР, новая серия, т. 76, 1951, 6.
14. Н. З. Френкель. Гидравлика. 1956.
15. Г. А. Адамов. Общее уравнение для закона сопротивления при турбулентном течении и новые формулы коэффициента сопротивления труб. Вестник инж. и техн. 1952, 1.
16. ТУИ Н 34-55. Гидравлические потери на трение по длине водоводов электрических станций, 1956.
17. И. И. Агроскин. Расчетная формула для коэффициента Шези, Гидротехническое строительство 1949, 2.
18. С. Я. Вартазаров. Бактериальная коррозия металлических напорных трубопроводов, Гидротехническое строительство, 1950, 10.
19. F. Hergig. Untersuchungen über die Reibungsziffer betriebsrauer Röhre. Gas- u. Wasserfach, 1951, 21.
20. Н. Н. Гениев, Н. Н. Абрамов и В. И. Павлов. Водоснабжение. 1950.



1870-1880



Цена 1 рубль