Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLVII, вып. 1, 1962 г.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РУДНИЧНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

С. С. Смородин

В горной практике все более широкое применение находит трубопроводный транспорт жидкостей и газов. При расчете сложных воздухопроводных сетей, а также трубопроводов при гидравлической добыче угля большое значение имеет обеспечение у потребителей заданного давления. От этого зависят технические показатели работы машин и экономичность всей установки.

Используемые методы расчетов рудничных трубопроводов основаны на устаревших экспериментальных данных и не соответствуют современным требованиям.

Наиболее сложны транспортировка сжатого воздуха и расчет рудничных воздухопроводных сетей.

Пользуясь понятием эквивалентной длины, можно написать выражение для потери давления на участке трубопровода в следующем виде:

$$\Delta p = \lambda \frac{l_э}{d} \frac{c^2}{2g} \gamma_к \pm H_г \gamma_к, \qquad (1)$$

где λ — коэффициент сопротивлений;

$l_э$ — эквивалентная длина расчетного участка трубопровода постоянного диаметра, *м*;

c — средняя по сечению трубы скорость движения флюида, *м/сек*;

$\gamma_к$ — объемный вес, который для сжатого воздуха берется в конце расчетного участка трубопровода, *кг/м*^{3};

$H_г$ — разность высот между конечным и начальным сечением расчетного участка трубопровода, *м*;

d — диаметр трубопровода, *м*.

Формула (1) одинаково применима для расчета воздухопроводов и водоотливных труб или напорного транспорта жидкостей. Разница лишь в том, что для жидкости потеря давления определяется обычно в метрах, для чего все члены уравнения делятся на ее объемный вес.

Определение потери давления в трубопроводе связано с предварительным выбором коэффициента сопротивления, который при турбулентном движении потока является функцией нескольких переменных

$$\lambda = f(\mathrm{Re};\ k;\ M),$$

где Re — число Рейнольдса;

k — шероховатость;

M — число Маха.

Зависимостью коэффициента трения от величины M в обычных технических расчетах рудничных трубопроводов пренебрегают ввиду малой величины скорости течения воздуха по сравнению со скоростью звука.

В рудничных воздухопроводных сетях движение сжатого воздуха характеризуется большим числом Рейнольдса, обычно не менее 20 000, что свидетельствует о наличии турбулентного движения. Определению коэффициента сопротивления при турбулентном движении потока посвящено много исследований. Существующие методы расчета рудничных воздухопроводов (А. Гинц, М. М. Федоров, А. П. Герман) основаны на опытах К. Фритче. Иногда при расчете воздухопроводов для определения λ пользуются формулами Биля и Лашингера, при расчете водоотлива — формулой Ланга. В свете современных теоретических и экспериментальных данных эти формулы дают заниженные численные значения λ, поэтому необходима новая формула для расчетов рудничных трубопроводов.

В практике газы и жидкости транспортируют по трубам так называемой естественной шероховатостью, которая характеризуется различной шириной, высотой и формой выступов, а также частотой расположения их на поверхности и степенью неравномерности всех указанных факторов. Следовательно, практически существует огромное разнообразие шероховатых поверхностей.

Вопрос усложняется тем, что первоначально созданная шероховатость при изготовлении труб (металлическая шероховатость) претерпевает непрерывные изменения в результате коррозии и образования отложений, зависящих в свою очередь от характера транспортируемой жидкости или газа, от взаимодействия металла с транспортируемой жидкостью, срока и режима эксплуатации и т. д. Поэтому задача гидравлического расчета шероховатых труб окончательно не решена.

Большинство исследований основано на логарифмическом законе распределения скоростей по сечению, дающем аналитическую связь с сопротивлением и хорошее совпадение расчета с опытными данными. Формулы для коэффициента сопротивления шероховатых труб, естественно, должны содержать коэффициент, отражающий абсолютную или относительную величину шероховатости. Прежде чем рассматривать существующие формулы для коэффициента сопротивления шероховатых труб и окончательно выбирать формулы, рассмотрим характер потока в рудничных воздухопроводах. Различают две области изменения коэффициента сопротивлений шероховатых труб при турбулентном движении: 1) переходную, характеризуемую не вполне развитой турбулентностью, где коэффициент сопротивления зависит от числа Рейнольдса и шероховатости; 2) область вполне развитой турбулентности, где коэффициент сопротивления зависит только от шероховатости. Границей, характеризующей переход в область вполне развитой турбулентности, является предельное число Рейнольдса $\mathrm{Re}''_{\text{пр}}$. Г. А. Мурин [2] предлагает определять

$$\mathrm{Re}''_{\text{пр}} = \left(120\,\frac{d'}{k_{\text{э}}}\right)^{1{,}125} \qquad (2)$$

где $k_{\text{э}}$ — эквивалентная шероховатость, *мм*;

d' — диаметр трубопровода, *мм*.

По данным Ф. А. Шевелева [3], вполне развитая турбулентность наступает при

$$\mathrm{Re}''_{\text{пр}} = 9{,}2 \quad 10^5 d. \qquad (3)$$

Е. Я. Соколов [4] считает

$$Re''_{пр} = 400\frac{d'}{k_э} \qquad (4)$$

Кривые предельных и фактических значений $R''_{пр}$ (рис. 1) показывают, что для всех практически встречающихся диаметров труб действительный характер потока в рудничных воздухопроводах соответствует области квадратичного закона сопротивлений.

Для решения вопроса о возможном характере потока в рудничных воздухопроводных сетях по формуле (4) рассчитаны максимальные скорости движения $c_{пр}$ для разных давлений и температур сжатого воздуха, при которых наступает вполне развитая турбулентность. При действительных скоростях, больших, чем приведенные в табл. 1, коэффициенты трения можно считать величинами постоянными, зависящими только от шероховатости труб. Для наиболее гладких труб при низких давлениях получена предельная скорость, равная 6,4 *м/сек*. В действительности $k_э = 0{,}2$ мало вероятна даже для труб диаметром 200 *мм*, применяемых для магистральных трубопроводов.

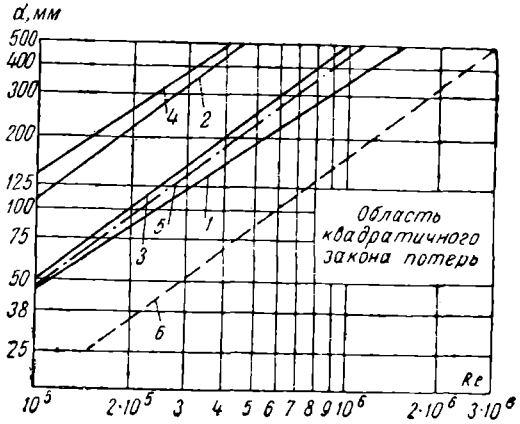


Рис. 1. Предельные $Re_{пр}$, характеризующие переход потока в область квадратичного закона потерь:

1 — по формуле Мурина; *2* — Шевелева; *3* — Соколова; *4* — Адамова; *5* — фактические при $p = 8$ *ати*, $c = 8$ *м/сек*, $t = -10°$; *6* — фактические при $p = 4$ *ати*, $c = 6$ *м/сек*, $t = +10°$

Таблица 1

Давление сжатого воздуха, *ати*	Температура воздуха в трубопроводе, *град*	Кинематическая вязкость, $*10^6$	Действительная скорость потока при $k_э$ (*мм*), *м/сек*				
					0,8	1,0	2,0
4	20	3,20	6,40	3,20	1,60	1,28	0,64
5	20	2,60	5,21	2,60	1,32	1,04	0,52
8	20	1,70	3,40	1,75	1,35	0,68	0,34
4	0	2,80	5,60	2,80	1,41	1,12	0,56
5	0	2,30	4,62	2,33	1,15	0,92	0,46
8	0	1,45	2,89	1,45	0,73	0,58	0,29
4	—10	2,49	4,98	2,50	1,25	1,00	0,50
5	—10	1,98	3,96	2,00	1,00	0,79	0,40
8	—10	1,77	3,54	1,80	1,43	0,71	0,36

Транспортировка сжатого воздуха по магистралям осуществляется обычно при давлениях не ниже 6 *ати* и скоростях 6 ÷ 12 *м/сек*. При меньших диаметрах труб и с большей эквивалентной шероховатостью предельные скорости значительно меньше действительных.

На основании работ Г. А. Мурина и ряда других исследователей среднюю эквивалентную шероховатость для новых стальных труб после некоторого срока хранения рекомендуется принимать 0,2 *мм* [8]. По другим источникам [10] — предлагается $k_э = 0{,}8$ *мм*. Однако вопрос о вели-

чине шероховатости рудничных трубопроводов при транспортировке сжатого воздуха еще неокончательно решен, так как остается неизвестным закон изменения шероховатости при эксплуатации воздухопроводов. На характер изменения шероховатости внутренних стенок труб несомненно воздействуют специфические условия шахт и рудников: качество рудничных вод и водообильность (при монтаже, особенно на участках, вода попадает в трубы), тип компрессора (при поршневых — в трубы попадает значительно большее количество масла, чем при турбинных) и т. п.

Сопоставим наиболее распространенные формулы определения коэффициента сопротивлений шероховатых труб. Для этого разделим все формулы на эмпирические и полуэмпирические. К первой категории относят формулы К. Фритче, Биля и Лашингера. Они получены для тех-

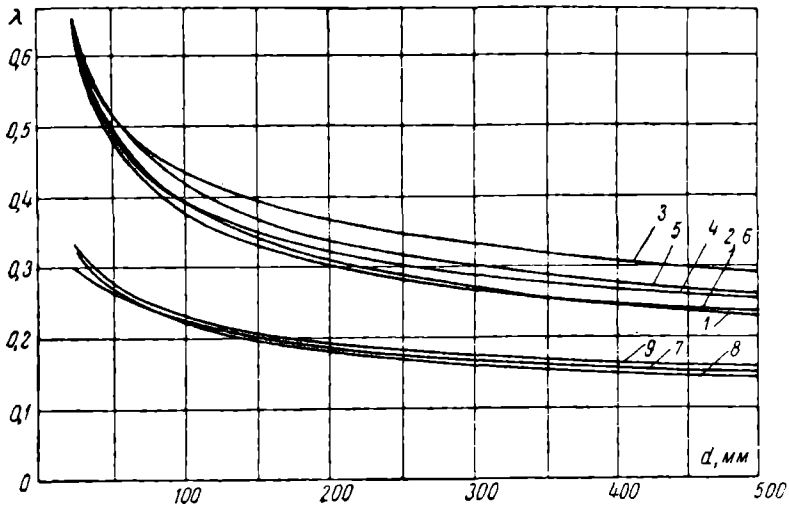


Рис. 2. Кривые $Re''_{пр}$ в квадратичной области потерь по данным:
1 — Маннинга ($r = 0{,}012$ для наибольшей шероховатости); *2* — Прандтля — Никурадзе ($k = 1$ для наибольшей шероховатости); *3* — Шифринсона ($k_э = 0{,}25$); *4* — Соколова ($k_э = 1{,}4$); *5* — Шевелева; *6* — Тепакса ($\Delta = 0{,}3$); *7* — Фритче; *8* — Биля; *9* — Прандтля — Никурадзе ($k = 0{,}2$ для наименьшей шероховатости)

нических труб средней шероховатости при турбулентном движении без различия степени турбулентности. В основе всех существующих методов расчета рудничных воздухопроводов лежит формула

$$\lambda = \frac{2g}{10^4}\beta, \tag{5}$$

где по опытам К. Фритче

$$\beta = \frac{9{,}4\ \ 10^{-8}}{(\gamma c)^{0{,}148} d^{0{,}269}} \tag{6}$$

После преобразования формулы (5) получим

$$\lambda = \frac{0{,}03}{Q^{0{,}148}}, \tag{7}$$

где Q — количество свободного воздуха, протекающего по трубопроводу, $м^3/мин$ (при $t = 10°$).

Формула Биля в функции весового количества протекающего воздуха или, что то же, объемного расхода

$$\lambda \frac{0{,}0294}{G^{0{,}125}} = \frac{0{,}0276}{Q^{0{,}125}}. \tag{8}$$

Так как по одному и тому же трубопроводу можно транспортировать различное весовое или объемное количество воздуха, то, очевидно, по этим формулам будут получаться различные коэффициенты сопротивления для каждого диаметра трубы. Наибольшее значение λ по формулам (7) и (8) рассчитаем при низких давлениях (4 *ати*) и малых скоростях движения (4 *м/сек*). По результатам расчетов построены кривые *7* и *8* на рис. 2.

К эмпирическим относят и формулы Лашингера и Ланга. Формула Лашингера дает еще меньшие значения λ, чем формулы Фритче и Биля. По формуле Ланга λ на 8—10% больше, чем по формуле Фритче.

Полуэмпирические формулы по характеру потока предназначены для: 1) переходной области; 2) квадратической области сопротивлений; 3) обеих областей турбулентного движения — универсальные.

В переходной области [3]

$$\lambda_{\text{пер}} = \frac{\beta}{\mathrm{Re}^{m_1}}. \tag{9}$$

Исследования Ф. А. Шевелева эпюр скоростей в трубах показали, что логарифмический закон распределения скоростей наилучший.

$$\frac{v_{\text{м}} - v_{\text{ср}}}{v_{\text{д}}} = \frac{1}{\varkappa} \ln \frac{r}{y_{\text{ср}}} = \beta, \tag{10}$$

где $v_{\text{м}}$, $v_{\text{ср}}$ и $v_{\text{д}}$ — максимальная, средняя и динамическая скорости потока.

$$v_{\text{д}} = v_{\text{ср}} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{пер}}}{8}}$$

Тогда формула (10)

$$\beta = \frac{v_{\text{ср}} \left(\frac{v_{\text{м}}}{v_{\text{ср}}} - 1 \right)}{v_{\text{ср}} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{пер}}}{8}}} = \frac{\left(\frac{v_{\text{м}}}{v_{\text{ср}}} - 1 \right) \sqrt{8}}{\sqrt{\lambda_{\text{пер}}}}, \tag{11}$$

откуда

$$\lambda_{\text{пер}} = \frac{\left(\frac{v_{\text{м}}}{v_{\text{ср}}} - 1 \right)^2 8}{\beta^2}, \tag{12}$$

где β — параметр, зависящий от диаметра трубопровода.

По экспериментальным данным Ф. А. Шевелева, параметр β при шероховатых трубах зависит в основном от диаметра трубы. Значение β близко к постоянной величине при турбулентном движении как в переходной, так и квадратичной областях. Зависимость

$$\beta = 4{,}24 d^{0{,}08} \tag{13}$$

Для гладких труб можно брать среднее значение $\beta = 4{,}21$. По опытам И. Никурадзе, для гладких труб

$$\frac{v_{\text{м}}}{v_{\text{ср}}} - 1 = \frac{0{,}744}{\mathrm{Re}^{0{,}113}}. \tag{14}$$

По формуле П. К. Конакова [5], для гладких труб в переходной области

$$\lambda_{\text{пер}} = \lambda_{\text{гл}} = \left(\frac{0{,}744}{\mathrm{Re}^{0{,}113}} \right)^2 \frac{8}{4{,}21^2} = \frac{0{,}25}{\mathrm{Re}^{0{,}226}}. \tag{15}$$

В практике формулой Прандтля—Никурадзе

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{гл}}} = 2\lg \mathrm{Re}\sqrt{\lambda_{гл}} - 0{,}8 \qquad (16)$$

пользоваться трудно, так как коэффициент сопротивления в ней может быть найден только методом последовательных приближений.

Для области полностью развитой турбулентности существует много формул определения λ. Рассмотрим только наиболее распространенные, а также теоретически наиболее обоснованные.

Для небольших диаметров труб Маннинг [6] предложил формулу

$$\lambda_{кв} = 124{,}6\frac{n^2}{\frac{1}{d^3}}, \qquad (17)$$

где n — коэффициент шероховатости (с учетом возможных отклонений диаметра трубы при изготовлении и значительных отложений), равный 0,00953, 0,0107 и 0,012 соответственно при малой, средней и наибольшей шероховатостях.

При наибольшей шероховатости

$$\lambda_{кв} = \frac{0{,}018}{\frac{1}{d^3}} \qquad (18)$$

Наиболее известной длительное время была формула Прандтля—Никурадзе

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{кв}}} = 2\lg\frac{3{,}7d}{k}, \qquad (19)$$

где k — абсолютная шероховатость внутренней поверхности трубы, *мм*)

Первоначально под абсолютной шероховатостью, по определению И. Никурадзе (по опытам с искусственной шероховатостью), понималась высота выступов шероховатости. Однако при экспериментах даже с той же искусственной шероховатостью никому не удалось воспроизвести результатов Никурадзе. В дальнейшем на основе теоретических исследований обтекания шероховатой стенки турбулентным потоком Л. Н. Тепакс неизбежно пришел к статистическому рассмотрению всех явлений [7]. Поэтому в настоящее время в формуле Прандтля—Никурадзе вместо k подставляется гидравлически эквивалентная абсолютная шероховатость

$$k_э = k\varphi, \qquad (20)$$

где φ — коэффициент, характеризирующий поверхность (форму неровностей, соотношение высоты выступов, расстояние между выступами, характер и частоту расположения выступов и т. д.

Эквивалентная абсолютная шероховатость стальных круглых труб определяется только по данным испытаний в области квадратичного сопротивления [8].

Близкое совпадение с опытными данными для стальных труб дает формула Б. Л. Шифринсона [9].

$$\lambda_{кв} = 0{,}11\left(\frac{k}{d'}\right)^{0{,}25} \qquad (21)$$

Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что абсолютная эквивалентная шероховатость промышленных стальных труб изменяется от 0,06 до 1,0 *мм*. В трубопроводах для транспорти-

ровки сжатого воздуха [10] рекомендуется расчетное $k_э = 0{,}8$. Для тепловых сетей Е. Я. Соколов [3] на основании формулы Г К. Филоненко предлагает упрощенное определение коэффициента сопротивления стальных труб

$$\lambda_{кв} = \left(\frac{0{,}55}{\lg \frac{d}{k_э} + 0{,}9}\right)^2 \qquad (22)$$

При гидравлическом расчете стальных трубопроводов с учетом увеличения их сопротивления в процессе эксплуатации Ф. А. Шевелев [3] рекомендует определять коэффициент сопротивления в квадратичной области

$$\lambda_{кв} = \frac{0{,}021}{d^{0{,}3}} \qquad (23)$$

Л. А. Тепакс [7] на основе исследования граничных условий турбулентного потока при обтекании шероховатых стенок, пользуясь известным понятием коэффициента виртуальной вязкости, получил выражение распределения скоростей в виде логарифмического закона и формулу коэффициента сопротивления для квадратичной области

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{кв}}} = 07 + 2\lg\frac{r}{\Delta}, \qquad (24)$$

где Δ — абсолютная шероховатость, *мм*,

$$\Delta = 0{,}3k_э;$$

r — радиус трубы, *мм*.

В процессе эксплуатации трубопроводов могут встретиться области квадратичного закона и переходная. Кольбрук-Уайт попытался установить единую зависимость для этих двух областей

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2\lg\left(\frac{\Delta}{3{,}7d} + \frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}}\right) \qquad (25)$$

Г. А. Адамов, объединив формулы Прандтля—Никурадзе и П. К. Конакова, предложил универсальную формулу для резко неравномерной шероховатости [1]

$$\lambda = \frac{1}{4\left[\lg\left(\frac{1}{0{,}178\,\mathrm{Re}^{0{,}9}} + 0{,}135\frac{\Delta}{r}\right)\right]^2}. \qquad (26)$$

Тем же путем объединения различных формул для разных областей установлены зависимости А. Д. Альтшуля, В. Н. Попова и др.

Преимущество формулы Г А. Адамова перед уравнением (25) в том, что в (26) λ выступает в явном виде. Другие формулы не рассматриваются, так как они также не имеют преимуществ перед выражением (26). Тем более, что формула Адамова используется здесь лишь для того, чтобы другим путем доказать наличие вполне развитой турбулентности в рудничных воздухопроводах. Это ясно видно из табл. 2, где приведены значения коэффициентов сопротивления по формуле (26) при абсолютной шероховатости $\Delta = 0{,}2$ *мм*.

Сравнение чисел Рейнольдса (см. табл. 2), при которых наступает постоянство значений λ, с действительными (см. рис. 1), показывает, что фактические значения Re даже при низких давлениях сжатого воздуха свидетельствуют о наличии в рудничных воздухопроводах квадратичного закона сопротивления, так как даже при минимальной шероховатости (0,2 *мм*) фактические значения Re оказались почти на границе перехода в квадратичную область сопротивления.

Таблица 2

Re	$\lambda \cdot 10^2$ при Δ 0,2 для диаметров труб (*мм*)						
	20	50			200	300	400
$1 \cdot 10^4$	4,28	3,81	3,55	3,36	3,20	3,18	3,16
2	4,00	3,46	3,22	3,02	2,76	2,78	2,79
4	3,90	3,18	2,98	2,70	2,50	2,44	2,36
6	3,85	2,97	2,78	2,46	2,33	2,25	2,16
8	3,82	2,88	2,60	2,33	2,23	2,16	2,07
$1 \cdot 10^5$	3,80	2,83	2,50	2,24	2,16	2,12	2,03
2	↓	2,79	2,44	2,17	2,08	1,98	1,86
4	const		2,41	2,15	1,97	1,87	1,75
6				2,13	1,96	1,84	1,70
8				↓	1,94	1,80	1,67
$1 \cdot 10^6$				const		1,80	1,65
2							1,61
4							1,59
							↓
							const

Дадим оценку различных формул для квадратичной области по величине численных значений коэффициентов сопротивлений. Кривые расчетов (рис. 2, кривые 1, 6) по формулам (18), (19), (21), (24) показывают, что для диапазона диаметра труб 25—500 *мм* коэффициенты сопротивлений изменяются в среднем от 0,0635 до 0,024—0,29. В соответствии с этими пределами λ для квадратичной области (минимальными для каждой шероховатости) уместно вновь рассмотреть формулу (26) Г. А. Адамова, где по средним значениям λ в квадратичной области для каждого диаметра трубы определены минимальные Re, характеризующие условие перехода в квадратичную область сопротивлений.

Приводим сравнение $Re''_{пр}$ (по Адамову) с наименьшими фактическими $Re_ф$ в рудничных воздухопроводах при $p = 4$ *ати*, $c = 4$ *м/сек* и $t = +10°$:

Диаметр труб, *мм*	25	50	100	203	307	404	500
$10^{-4} Re''_{пр}$	2,10	4,50	7,15	15,50	24,30	33,60	42,70
$10^{-4} Re_ф$	3,62	7,22	14,39	29,09	44,21	58,26	72,15

Критериальная кривая $Re''_{пр}$ по формуле Адамова (рис. 1, кривая *4*) наилучшим образом совпадает с кривой Шевелева (кривая *2*); расхождение 7—3% в сторону сужения переходной области.

Как видно из сопоставления кривых рис. 2, численные значения коэффициентов сопротивлений по формуле Фритче значительно ниже величин, полученных современными исследованиями турбулентного движения жидкостей и газов по стальным круглым трубам с шероховатой внутренней поверхностью. Результаты подсчетов по формулам Фритче и Биля хорошо совпадают с данными Прандтля—Никурадзе при наименьшей шероховатости ($k = 0{,}15$).

Из распространенных формул для квадратичной области следует предпочесть одночленное выражение (23), полученное Ф. А. Шевелевым на основании современной статистической теории турбулентного движе-

ния потока жидкости и использования большого экспериментального материала с учетом сопротивлений в стыках и других факторов. Кривая коэффициентов сопротивлений Ф. А. Шевелева точно совпадает с кривой Прандтля—Никурадзе при $k=1{,}4$ для труб диаметром 100—500 *мм*, при $k=1{,}2$ для труб диаметром 50—100 *мм* при $k=1{,}1$ для труб диаметром 25—50 *мм*. Для всего диапазона изменений диаметров труб (от 25 до 500 *мм*) коэффициенты сопротивлений по уравнению Шевелева дают расхождения соответственно от —6,3 до +4,7% с величинами, определенными по уравнению Прандтля—Никурадзе при $k=1{,}1$.

Из рассмотренных многочисленных исследований коэффициента сопротивления в рудничных воздухопроводах можно сделать вывод о приемлемости уравнения (23) как наиболее простого и наилучшим образом отвечающего современному уровню теории и опытным данным.

При расчете рудничных водоотливных установок, когда характер потока в области развитой турбулентности, применима формула (23); когда поток в переходной области, необходимо пользоваться формулой (15) или универсальной формулой (26).

ЛИТЕРАТУРА

1. Адамов Г А. Общее уравнение для закона сопротивления при турбулентном течении и новые формулы коэффициента сопротивления шероховатых труб. Вестн. инженеров и техников, 1952, № 1.

2. Мурин Г М. Гидравлическое сопротивление стальных труб. Изв. ВТИ, 1948, № 10.

3. Шевелев Ф. А. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах, Госстройиздат, 1953.

4. Соколов Е. Я. Некоторые вопросы гидравлического расчета тепловых сетей. Тр. Моск. энергетич. ин-та, 1956, вып. XXIV

5. Конаков П. К. Новая формула для коэффициента сопротивления гладких труб. ДАН СССР Новая серия, 1946, т. LI, № 7.

6. Лобачев В. Г. и Абрамов Н. Н. Гидравлический расчет водопроводных труб малых диаметров. Изд-во ком. хоз-ва, 1940.

7. Тепакс Л. А. Граничные условия турбулентного потока при обтекании шероховатых стенок. Эстгосиздат, 1956.

8. Мурин Г. А. Гидравлическое сопротивление стальных нефтепроводов. «Нефтяное хозяйство», 1951, № 4.

9. Шифринсон Б. Л. Основной расчет тепловых сетей (теория и методы расчета). Госэнергоиздат, 1940.

10. Попов В. Н. Гидравлический расчет напорных трубопроводов гидростанций. Госэнергоиздат, 1950.