

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

№ 83

1956

Л. А. ТЕПАКС

**ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
ТРУБ В ДОКВАДРАТИЧНОЙ
ОБЛАСТИ**



ЭСТОНСКОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИН 1956

Er 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

№ 83

1956

Л. А. ТЕПАКС

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРУБ В ДОКВАДРАТИЧНОЙ ОБЛАСТИ

Er. 50

ENSV Teaduste Akadeemia
Keskraamatukogu



ЭСТОНСКОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИН 1956

Ep 6.7

THE UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY

1944

10 21

10 21

THE UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY
TYPE 6 DONOR PAPER
SERIALS

Ep 6.7

THE UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY

1. О ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА

И. Никурадзе¹, на основании обработки своих опытов по сопротивлению труб с искусственной зернистой шероховатостью, предложил следующую схему обтекания стенки: при малой скорости обтекания, выступы шероховатости полностью прикрыты ламинарным слоем (область гладкой трубы). С возрастанием скорости, толщина ламинарной пленки уменьшается. В доквадратичной области эта толщина соответствует приблизительно величине выступов шероховатости. В области квадратичного сопротивления ламинарный слой исчезает.

Автором² настоящей работы предлагается новая схема граничных условий. Шероховатость стенки можно рассматривать, как скопление небольших тел, расположенных в одной плоскости. При малой скорости у стенки выступы шероховатости вызывают только искривление струек. В небольшом слое, расположенном у стенки, скорость распределяется по закону

$$\frac{u}{u_*} = \frac{yu_*}{\nu} \quad (1-1)$$

При возрастающей скорости за выступами образуются мертвые области; при еще больших скоростях начинается отрыв вихрей, которые уносятся потоком. Развитие турбулентности в пристенном слое характеризуется выражением распределения скоростей, аналогичным (1-1):

$$\frac{u}{u_*} = \frac{yu_*}{\epsilon_{ст}}, \quad (1-2)$$

где $\epsilon_{ст}$ — коэффициент виртуальной вязкости на стенке. Для упрощения записей, этот коэффициент представляется в дальнейшем символом ϵ без индекса.

В предлагаемой схеме на стенке происходит постепенно одновременное уменьшение толщины и развитие турбулентности пристенного слоя. В квадратичной области этот

слоя не исчезает; его толщина соответствует приблизительно величине выступов шероховатости.

Замена коэффициента вязкости ν коэффициентом виртуальной вязкости на стенке ε приводит к формулам распределения скорости

$$\frac{u}{u_*} = 5,5 + 5,75 \lg \frac{yu_*}{\varepsilon} \quad (1-3)$$

и сопротивления круглой трубы

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0,7 + 2 \lg \frac{ru_*}{\varepsilon}, \quad (1-4)$$

аналогичным формулам Прандтля³.

В цитируемой работе² показывается, что в квадратичной области виртуальная вязкость не зависит от действительной:

$$\varepsilon = bu_* k, \quad (1-5)$$

где k — размер выступа шероховатости и b — коэффициент пропорциональности. Для зернистой шероховатости Никурадзе $b = 0,3$.

Имея в виду, что шероховатость Никурадзе является далеко не типичной, нет основания рассматривать ее как стандартную. В выражении (1-5) можно отказаться от лишнего коэффициента b и переписать (1-5) в виде

$$\varepsilon = u_* \Delta. \quad (1-6)$$

Величину Δ , определяемую выражением (1-6) и имеющую размерность длины, мы предлагаем называть абсолютной шероховатостью. Она определяется на основании опытов в квадратичной области, пользуясь выражением сопротивления, полученного подстановкой (1-6) в (1-4):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0,7 + 2 \lg \frac{r}{\Delta}. \quad (1-7)$$

Абсолютную шероховатость можно определить также и по эпюре скоростей, подставив (1-6) в (1-3), однако более точные результаты дает формула сопротивления (1-7). Наконец абсолютную шероховатость можно подсчитать по величине эквивалентной зернистой шероховатости (по Никурадзе), если она известна:

$$\Delta = 0,3 k_s. \quad (1-8)$$

2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ОПЫТОВ

Выражение (1—4) можно представить в виде

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0,7 + 2 \lg \frac{ru_*}{\nu} - 2 \lg \frac{\varepsilon}{\nu}, \quad (2-1)$$

или в виде

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

Соотношение $\frac{\varepsilon}{\nu}$, называемое показателем турбулентности на стенке, определяет закономерности сопротивления. При ламинарном обтекании выступов шероховатости, т. е. в области гладкой трубы

$$\frac{\varepsilon}{\nu} = 1. \quad (2-3)$$

В квадратичной области сопротивления, по (1—6)

$$\frac{\varepsilon}{\nu} = \frac{\Delta u_*}{\nu}. \quad (2-4)$$

В доквадратичной области, показатель турбулентности имеет вид функции

$$\frac{\varepsilon}{\nu} = f \left(\frac{\Delta u_*}{\nu} \right). \quad (2-5)$$

Зависимость (2—5) определяется опытами, пользуясь выражением (2—1). Показатель турбулентности можно определить также и по эпюрам скоростей, переписав (1—3) в виде

$$\frac{u}{u_*} = 5,5 + 5,75 \lg \frac{yu_*}{\nu} - 5,75 \lg \frac{\varepsilon}{\nu}. \quad (2-6)$$

Согласно литературным данным сопротивление изучено лучше, чем распределение скоростей. Поэтому в настоящей работе излагается обработка опытов по (2—1).

Рассматривая граничные условия, следует также определить понятие «плоскости стенки», т. е. ту плоскость, от которой следует отсчитывать расстояние от стенки y .

Динамическая скорость определяется формулой

$$u_* = \sqrt{gRi}, \quad (2-7)$$

т. е. понятием гидравлического радиуса R . Выражение (2—7) получается при наличии равномерного движения определенного объема жидкости, причем все действующие силы уравниваются. Поэтому гидравлический радиус и другие размеры, характеризующие поперечное сечение потока, следует определять объемным способом, как это обычно и делается. Этим определяется также и плоскость нулевого значения координаты y .

Если представить схематически шероховатую стенку в виде равномерных выступов или ребер прямоугольного сечения (рис. 1), то, в зависимости от густоты выступов, плоскость стенки, определяемая объемным способом, может иметь разные положения. При бесконечно большом расстоянии выступов друг от друга ($c = \infty$) влияние выступов исчезает, и координата y отсчитывается от геометрической плоскости стенки. При этом соблюдается условие: при

$$y = 0 \quad u = 0. \quad (2-8)$$

По мере увеличения густоты выступов, плоскость стенки отдалается. При предельном заполнении ($c = 0$) плос-

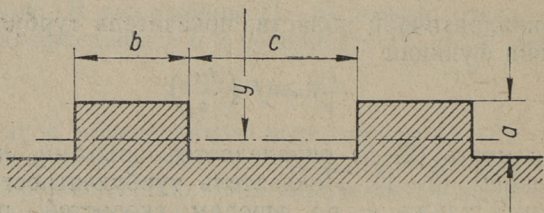


Рис. 1.

кость стенки совпадает опять с геометрической плоскостью, и условие (2—8) вновь действительно. Можно предположить, что условие (2—8) остается в силе и в промежуточных случаях, т. е. при любой густоте выступов. Действительны также граничные условия, определенные выражениями (1—1) и (1—2).

Таким образом, вышеизложенное предположение, что при анализе влияния структуры шероховатости на сопротивление, наиболее правильным является определение размеров поперечного сечения потока объемным способом, подтверждается.

3. О КЛАССИФИКАЦИИ ШЕРОХОВАТОСТЕЙ

Закономерность сопротивления (1—4) зависит от характера шероховатости. Строго говоря, каждому типу шероховатости соответствует свое индивидуальное выражение, отражающее (2—5). Этим объясняется огромное количество формул, предложенных многими авторами.

Л. Гопф⁴, анализируя многочисленные экспериментальные данные, подразделил все шероховатости на три категории. К первой категории относятся так называемые «шероховатые» поверхности, причем λ является независимым от Re . Вторая категория — «волнистая» шероховатость — соответствует закономерности, где кривая λ проходит параллельно той же кривой для гладкой трубы. Отметим, что к этой категории принадлежат также и поверхности, не обладающие «волнами», как деревянные и асфальтированные железные трубы. Более правильно характеризовать эту категорию, как шероховатость с неравномерными и редко расположенными выступами. Третья категория, по Гопфу, является промежуточной между двумя первыми.

Эта классификация, встречающаяся иногда в современных учебниках, имеет произвольный характер. Первая категория соответствует в действительности области квадратичного сопротивления, две остальные — доквadraticной области. Классификация отражает не столько саму шероховатость, сколько область, в которую попали опытные точки. Но при этом можно сделать полезный вывод, что для одних шероховатостей переходная область имеет более распластаный характер, чем для других. В частности, наиболее широкую доквadraticную область имеют шероховатости второго, т. е. «волнистого» типа.

И. Никурадзе¹, желая учесть влияние размера шероховатости, пользовался отсеянным песком, наклеенным на поверхность стенки. Неожиданно выяснилось, что эта шероховатость является нового, до тех пор мало исследованного типа. Функция, изображающая зависимость λ (Re), имеет минимум в переходной области, в то время как все другие шероховатости представлены монотонными функциями, показывающими постепенное уменьшение коэффициента сопротивления при возрастании числа Рейнольдса.

Выяснилось также, что минимум в переходной области наблюдается и в случае близко расположенных ребер.

Об этом свидетельствуют опыты А. Джибсона⁵ (ребра волнистой формы, соотношение длины волны к высоте 4,0), а также и опыты В. Стритера⁶ (ребра разных форм, соотношение шага ребра к его высоте в пределах 3,95—8,69).

Другие опыты с искусственной шероховатостью (напр. опыты Ф. А. Шевелева⁷) показывают, что при редко расположенных выступах зависимость λ (Re) не имеет минимума.

Влияние расстояния между выступами на закономерности сопротивления изучалось многими авторами. Х. Моррис⁸ подразделил шероховатости на три группы. Первая группа — «изолированная» шероховатость — представляет редко расположенные выступы, причем сопротивление каждого выступа не зависит от других выступов. К второй группе — «интерферирующей» шероховатости — относятся близко расположенные выступы, затеняющиеся друг другом при обтекании. К третьей группе — «квази-гладкой» шероховатости — относятся впадины на стенке, заполненные вихрями; поток как бы перескальзывает через эти впадины. По Х. Моррису вторая группа имеет минимум в зависимости λ (Re); первая и третья минимума не имеют.

Классификацию Х. Морриса нельзя признать удачной. Наличие области гладкой трубы свидетельствует о ламинарном, безотрывном обтекании выступов. При этом редко расположенные выступы могут сопротивляться изолированно. При возрастающей скорости обтекания, за выступами образуются мертвые области, причем возможна интерференция. При дальнейшем возрастании скорости мертвые области могут исчезнуть (с началом отрыва вихрей); взаимное влияние выступов приобретает другой характер. Таким образом, на наш взгляд, одну и ту же шероховатость можно отнести к двум или даже ко всем трем группам Морриса, в зависимости от режима обтекания.

Некоторые авторы (напр. Г. А. Адамов⁹, Кольбрук и Уайт¹⁰) отмечают, что экстремум в переходной области имеет место только в случае близко расположенных выступов или ребер равномерной величины. Такие шероховатости будем называть в дальнейшем равномерными. Шероховатости без экстремума будут называться неравномерными. Шероховатости, встречающиеся в практике (напр. промышленные трубы) относятся к типу неравномерных.

Редко расположенные выступы, даже если они вполне равномерные по величине, относятся также к типу неравномерной шероховатости (напр. искусственная шероховатость Ф. А. Шевелева⁷, представляющая цилиндрики одинаковой величины, расположенные на стенке в шахматном порядке с равномерным шагом). Гладкую поверхность, расположенную между выступами, можно рассматривать как поверхность с очень малыми выступами. Таким образом крупные выступы чередуются с малыми, т. е. существует фактор неравномерности.

4. РАЗВИТИЕ ПРИСТЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Выражения (2—3), (2—4) и (2—5), описывающие развитие пристенной турбулентности, можно представить графически. Ламинарное обтекание выступов шероховатости

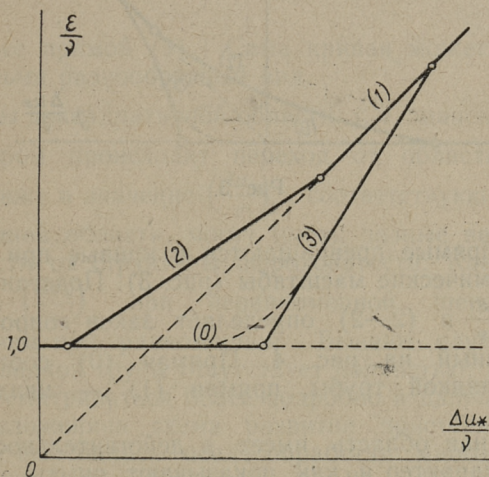


Рис. 2.

по (2—3) представлено на рис. 2 в виде горизонтальной прямой (0). Квадратичная область по (2—4) представлена прямой (1). Переходную область можно в первом приближении изобразить также в виде прямых (2) и (3).

Абсолютная шероховатость Δ определяется по среднему размеру выступов. Развитие турбулентности начинается с наибольших выступов. Чем больше максимальный размер

отличается от среднего, т. е. чем неравномернее структура шероховатости, тем раньше происходит переход от ламинарной области к турбулентной. Неравномерная шероховатость может быть представлена в виде прямой (2) на рис. 2.

При равномерной шероховатости, где выступы имеют почти одинаковую величину, следует ожидать более распластанную ламинарную область на стенке. Такую шероховатость можно представить в виде прямой (3) на рис. 2.

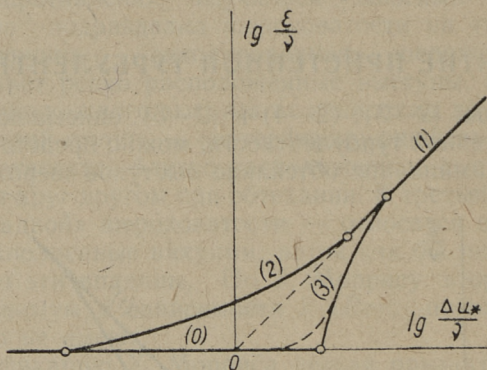


Рис. 3.

Те же прямые превращаются в кривые при переходе в логарифмические масштабы (рис. 3). Подстановка значений $\lg \frac{\xi}{\nu}$ в (2—2) определяет закон сопротивления, изображенный на рис. 4. Прямая (0) соответствует области гладкой трубы, прямая (1) — квадратичной области.

Переходная область имеет в действительности более сложный характер и, как показывают опыты, не может быть представлена в виде прямых на рис. 2. В случае равномерной шероховатости, взамен прямой (3) происходит плавное сопряжение, в виде пунктирной кривой на рис. 2, 3 и 4. Поэтому докватричная область представляется в действительности плавной кривой с экстремумом, а не острым пиком, как на рис. 4.

Согласно вышеизложенному, шероховатость относится к группе равномерных только в случае, если соответствующая кривая на рис. 2 и 3 заходит в область, расположен-

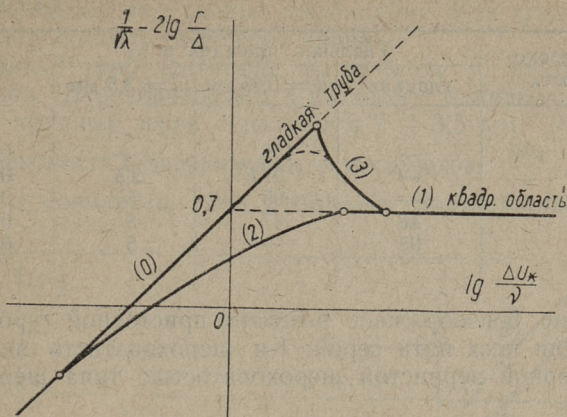


Рис. 4.

ную правее прямой (1). Сама кривая может при этом иметь весьма разнообразный вид.

Пределы доквadraticной области, т. е. значение $\left(\frac{\Delta u_*}{\nu}\right)_0$, при котором происходит переход от области гладкой трубы, также и значение $\left(\frac{\Delta u_*}{\nu}\right)_1$, соответствующее началу квадратичной области, могут иметь разные величины, в зависимости от структуры шероховатости. Как правило, величина $\left(\frac{\Delta u_*}{\nu}\right)_0$ при неравномерной шероховатости меньше, чем при равномерной. Бывают случаи, когда область гладкой трубы отсутствует полностью; эти случаи будут рассматриваться более подробно в дальнейшем.

Вышеизложенная схема развития пристенной турбулентности выяснилась после обработки многочисленных экспериментов по выражениям (2—2) и (2—5). В качестве примера приводим обработку опытов Кольбука и Уайта³⁰. В этих опытах исследовались разные шероховатости, созданные комбинированием трех основных типов: гладкая поверхность, равномерная шероховатость с диаметром песка 0,35 мм и отдельно расположенные (в шахматном порядке) крупные зерна гравия с диаметром 3,5 мм. В нижеследующей таблице 1 приводятся величины удельных площадей, занимаемые основными шероховатостями.

№ шероховатости	Удельная площадь в ‰			Δ мм
	гладкая	$d = 0,35$ мм	$d = 3,5$ мм	
1	—	100	—	0,144
2	—	97,5	2,5	0,219
3	—	95	5	0,279
4	48	47	5	0,198
5	95	—	5	0,114

На рис. 5 изображено развитие пристенной турбулентности для всех пяти серий: 1-я шероховатость является равномерной зернистой шероховатостью типа шерохова-

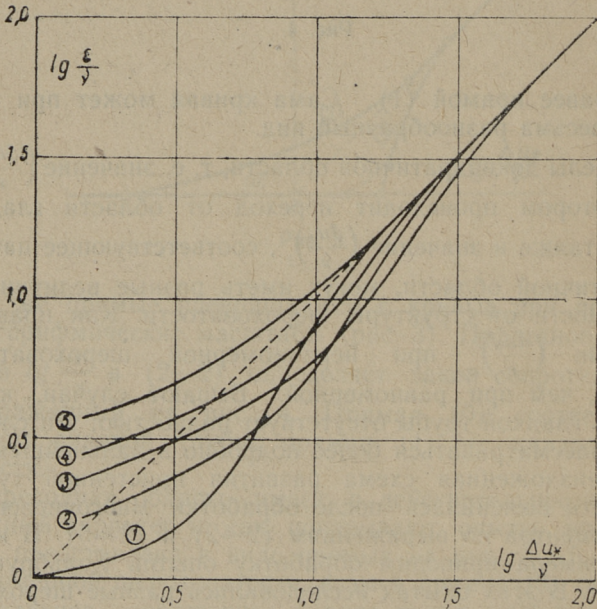


Рис. 5.

тости Никурадзе. 5-я шероховатость является гладкой поверхностью, к которой приклеивались крупные зерна, покрывающие 5‰ всей поверхности; эта шероховатость относится к группе неравномерных. Остальные шерохова-

тости представляют разные комбинации. Как видно, каждому типу соответствует своя кривая.

Развитие турбулентности начинается с наибольших выступов. Шероховатости 3, 4 и 5 имеют одинаковое количество крупных зерен с размером $k = 3,5$ мм. Развитие турбулентности в зависимости от параметра $\frac{ku_*}{\nu}$ должно частично совпадать. Это положение подтверждается на

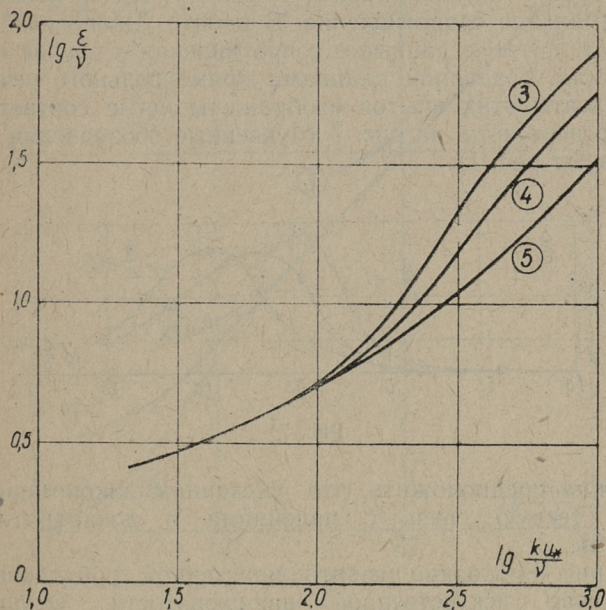


Рис. 6.

рис. 6, где все три кривые совпадают в начальной части; очевидно, что в этой области мелкие зерна не оказывают никакого влияния.

5. ВЛИЯНИЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ВЫСТУПАМИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ

Влияние структуры шероховатости на сопротивление изучалось многими авторами^{11, 12}. В большинстве случаев опыты охватывают только квадратичную область.

Исследование Р. Поуелла¹³ показывает, что величина

абсолютной шероховатости зависит от расстояния между ребрами. На основании своих опытов, а также и опытов Базена, Р. Поуелл приходит к выводу, что при уменьшении расстояния между ребрами эквивалентная шероховатость сперва увеличивается, а потом уменьшается. То же самое обнаружено Ф. И. Пикаловым¹⁴, которым рекомендуется при проектировании быстротоков с усиленной шероховатостью брать за расстояние между шашками или ребрами их восьмикратную высоту, обеспечивающую максимальное сопротивление. В работе Джонсона¹⁵ приводятся опытные данные о сопротивлении в случае шероховатости, созданной планками прямоугольного сечения. Результаты этих опытов изображены после соответствующего пересчета на рис. 7 (буквенные обозначения соответствуют рис. 1).

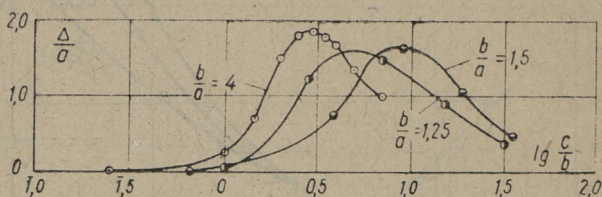


Рис. 7.

Можно предположить, что указанная закономерность имеет тесную связь с явлениями в доквadraticной области.

На рис. 8 показано развитие пристенной турбулентности в случае искусственной шероховатости, созданной Ф. А. Шевелевым⁷ (кривые 1, 2 и 3). Шероховатость 2 имела в 2 раза и шероховатость 3 в 4 раза большую густоту, чем шероховатость 1. Опыты показывают, что с уменьшением шага $\lambda_{кр}$ увеличивается также и абсолютная шероховатость Δ . Из рис. 8 видно, что вместе с увеличением сопротивления в quadraticной области сопротивление увеличивается и в доквadraticной области. Соответственно увеличивается и предел доквadraticной области $\left(\frac{\Delta u_*}{\nu}\right)_1$.

Рассматриваемые шероховатости относятся к группе неравномерных. Понятие коэффициента виртуальной вязкости ϵ носит здесь осредненный характер, представляя

среднее значение по всей площади стенки. На значительной части стенки турбулентность развивается иначе, чем непосредственно за выступами. Этим подтверждается целесообразность применения термина «неравномерная» шероховатость в рассматриваемом случае.

При дальнейшем уменьшении расстояния между высту-

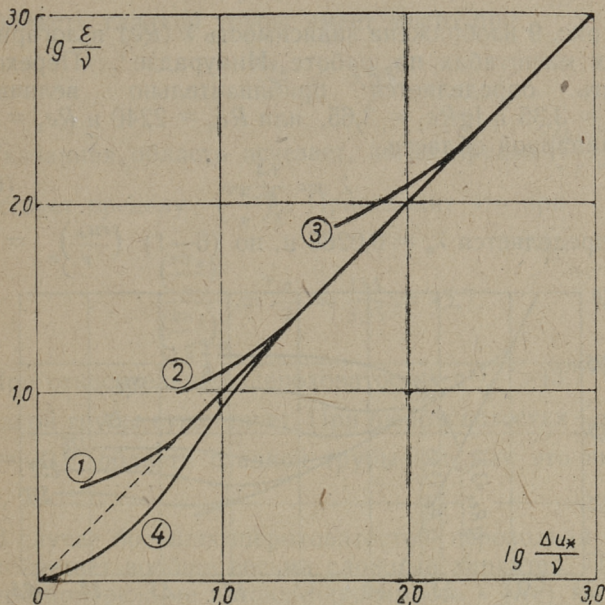


Рис. 8.

пами, фактор неравномерности изменяется и происходит переход к группе равномерных шероховатостей. При расположении выступов вплотную друг к другу можно ожидать шероховатость типа зернистой шероховатости Никурадзе (кривая 4 на рис. 8). Переход шероховатости из одной группы в другую происходит по-видимому при максимальном значении абсолютной шероховатости.

6. ПЕРЕХОД ОТ ЛАМИНАРНОГО ДВИЖЕНИЯ К ТУРБУЛЕНТНОМУ

Критерием перехода потока от ламинарного состояния к турбулентному является число Рейнольдса. Каждому

значению Re соответствует определенное значение коэффициента сопротивления λ . В качестве показателя режима движения можно взять критерий $Re\sqrt{\lambda}$, а также и пропорциональную ему величину

$$\frac{ru_*}{\nu} = \frac{Re\sqrt{\lambda}}{4\sqrt{2}}. \quad (6-1)$$

На рис. 9 изображена зависимость $\lambda(Re)$ в логарифмических масштабах по работе Никурадзе¹. Переходная область определяется приблизительно величинами $\lg Re_0 = 3,35$ и $\lg Re_1 = 3,65$, или $Re_0 = 2240$ и $Re_1 = 4470$. В ламинарной области

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (6-2)$$

чем определяется $\lambda_0 = 0,0286$ и, по (6-1) $\left(\frac{ru_*}{\nu}\right)_0 = 67$.

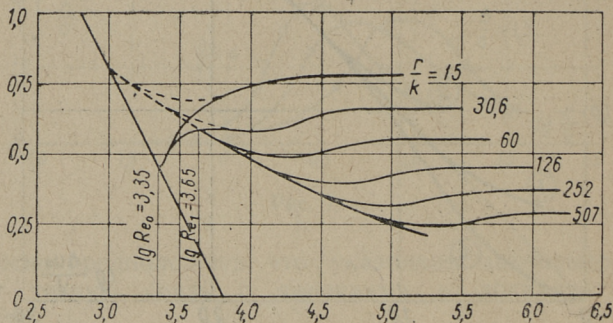


Рис. 9.

В турбулентной области, в случае гладкой трубы, принимаем за основу выражение Прандтля

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -0,8 + 2 \lg (Re\sqrt{\lambda}). \quad (6-3)$$

При $Re_1 = 4470$, по (6-3) и (6-1) получаем второй предел переходной области: $\lambda_1 = 0,0387$ и $\left(\frac{ru_*}{\nu}\right)_1 = 155$.

Критерием режима на стенке является, как установлено ранее, величина $\frac{\Delta u_*}{\nu}$. В случае искусственной шероховатости Никурадзе, можно взять за критерий также и вели-

чину $\frac{ku_*}{\nu}$. Никурадзе определил переходную область значениями

$$0,55 \leq \lg \frac{ku_*}{\nu} \leq 1,83,$$

чему соответствует $\left(\frac{ku_*}{\nu}\right)_0 = 3,55$ и $\left(\frac{ku_*}{\nu}\right)_1 = 67,6$.

Область гладкой трубы имеет место при

$$\frac{ku_*}{\nu} \leq 3,55.$$

Указанная область исчезает, когда предел $\left(\frac{ku_*}{\nu}\right)_0$ соответствует пределу $\left(\frac{ru_*}{\nu}\right)_1$. Происходит это при

$$\frac{\left(\frac{ru_*}{\nu}\right)_1}{\left(\frac{ku_*}{\nu}\right)_0} = \frac{r}{k} = \frac{155}{3,55} = 43,7. \quad (6-4)$$

При относительных шероховатостях с $\frac{r}{k} > 43,7$ область гладкой трубы существует. При шероховатостях $\frac{r}{k} = 15$ и $\frac{r}{k} = 30,6$ области гладкой трубы нет, как это видно из рис. 9.

В случае больших шероховатостей переходная область приобретает вообще весьма сложный характер. При турбулентном режиме потока зависимость λ (Re) изображалась бы в виде пунктирных кривых на рис. 9. В действительности же переходные области потока и стенки частично совпадают, что создает другую, пока еще не изученную схему движения жидкости. Одновременно с развитием турбулентности на стенке происходит переформирование скоростей в потоке, переход от параболического закона распределения скоростей к логарифмическому.

Можно предположить, что при дальнейшем увеличении относительной шероховатости, переходная область стенки будет покрывать частично ламинарную область потока. Согласно изложенным теоретическим рассуждениям, в этом случае на стенке создается турбулентность, которая не распространяется в потоке. Трудно сказать, что происходит в действительности, но можно предположить, что турбулентность на стенке обуславливает увеличение коэф-

коэффициента сопротивления по сравнению с гладкой стенкой. Можно предположить также, что турбулентность на стенке создает другие условия для нарушения стабильного состояния потока, т. е. для развития турбулентности в потоке. Следует ожидать, что за счет дополнительных возмущений переход потока от ламинарного движения к турбулентному произойдет при меньшем числе Рейнольдса, чем в случае гладкой трубы.

Вышесказанное подтверждается результатами опытов Г. М. Ломизе¹⁶, полученными при исследовании движения воды в шероховатых щелях.* Модель щели имела прямоугольное сечение. Шероховатость создавалась при помощи наклейки отсеянного песка.

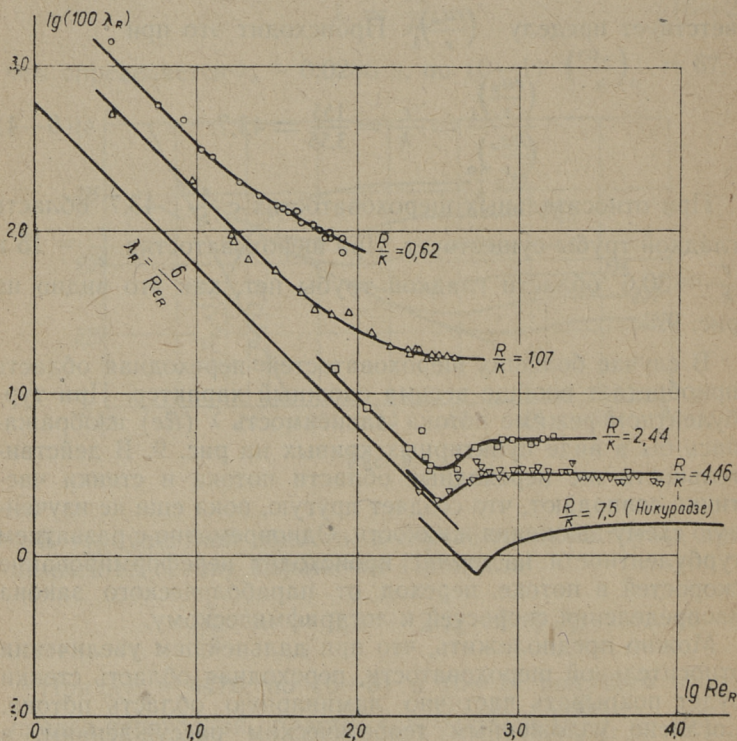


Рис. 10.

* Численные данные опытов были любезно предоставлены автору проф. Г. М. Ломизе.

На рис. 10 приведены 4 из 16-ти серий с разными относительными шероховатостями (серии № 1, 2, 4 и 14). Для всех четырех серий применялся песок величиной $k = 0,55$ мм. Разные относительные шероховатости получались путем изменения раскрытия щели. Коэффициент сопротивления и число Рейнольдса на рис. 10 выражены через гидравлический радиус. Там же показана соответственно пересчитанная кривая сопротивления Никурадзе для $\frac{r}{k} = 15$.

В случае очень шероховатых щелей — $\frac{R}{k}$ порядка единицы и меньше — движение в щели походит на движение в порах зернистого грунта. Переход от ламинарного движения к турбулентному происходит плавно в виде монотонной функции. При бóльших значениях $\frac{R}{k}$ наблюдается аналогия с кривой Никурадзе.

Г. М. Ломизе предложил эмпирическую формулу, согласно которой критическое число Рейнольдса, соответствующее началу переходной области, уменьшается с ростом относительной шероховатости.

Коэффициент сопротивления в ламинарной области выражается Г. М. Ломизе в виде

$$\lambda_R = \frac{6}{Re_R} \left[1 + 6 \left(\frac{k}{2R} \right)^{1,5} \right]. \quad (6-5)$$

Таким образом общепринятое положение о независимости коэффициента сопротивления от шероховатости при ламинарном режиме, теряет силу в случае больших относительных шероховатостей.

В исследовании А. П. Зегжда¹⁷ применялись лотки прямоугольного сечения; дно покрывалось искусственной шероховатостью путем наклейки отсеянного песка. Размер шероховатости определялся не по размеру песка, а косвенным путем, пользуясь формулой

$$\lambda_R = \frac{6}{Re_R}. \quad (6-6)$$

Расчеты по формуле (6-5) показывают, что при относительных шероховатостях $\frac{R}{k} = 5, 7$ и 10 коэффициент сопротивления получается на 19, 11,5 и 6,7% больше, чем

по формуле (6—6). Этим и объясняется сильное расхождение между фактическими и расчетными диаметрами песка, обнаруженное А. П. Зегжда.

В заключение отметим, что изложенные соображения о переходе от ламинарного движения к турбулентному применимы также и в случае неравномерных шероховатостей. Условие существования области гладкой трубы выражается аналогично (6—4) в виде

$$\frac{r}{l} > \frac{155}{\left(\frac{\Delta u_*}{\nu}\right)_0} \quad (6-7)$$

Ранее было доказано, что в случае неравномерных шероховатостей, величина $\left(\frac{\Delta u_*}{\nu}\right)_0$, соответствующая началу развития пристенной турбулентности, меньше, чем в случае равномерных шероховатостей (рис. 2). Вместе с тем, условие (6—7) часто не выполняется и при переходе потока от ламинарного режима к турбулентному на стенке существует начальная турбулентность. В таких случаях кривые $\lambda (Re)$ имеют вид кривых «волнистых» шероховатостей по Гопфу.

7. ПРАКТИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ ФОРМУЛЫ ВОДOPPOBODНЫХ ТРУБ

Подытожив изложенные соображения, можно утверждать, что гидравлическое сопротивление труб в доквадратичной области представляет сложное явление, требующее дополнительного изучения.

Выражение (2—5), определяющее закономерность сопротивления в доквадратичной области изображается в виде отдельных кривых для каждой шероховатости. В квадратичной области сопротивление характеризуется одной величиной (размером абсолютной шероховатости Δ или коэффициентом шероховатости n). В доквадратичной области невозможно получить единую формулу без дополнительных коэффициентов даже для промышленных труб. Невозможно также определить единые для всех типов шероховатости пределы доквадратичной области.

Установление чисто теоретическим путем закона сопротивления в доквадратичной области, является задачей, по-видимому, неразрешимой. Для зависимости (2—5) воз-

можно лишь подобрать аналитические выражения с коэффициентами, определяемые опытами.

Обработка многочисленных данных, приведенных в литературе, показывает, что шероховатости, называемые в настоящей работе равномерными, создаются лишь искусственным путем. В практике гидравлических расчетов мы встречаемся с неравномерными шероховатостями. Даже в случае каналов с деформируемым руслом, при образовании гряд правильной формы, получается неравномерная шероховатость, как показывает исследование Н. С. Знаменской¹⁸. Таким образом, равномерные шероховатости не представляют большого практического интереса.

В настоящей работе мы ограничимся рассмотрением сопротивления промышленных труб.

Наиболее простым, с точки зрения расчета, случаем являются гладкие трубы. Исследование С. В. Яковлева и Н. А. Масленникова¹⁹ показывает, что стеклянные трубы следует рассчитывать по формуле гладких труб. Обработка опытов Г. Физона²⁰ доказывает то же самое для медных, латунных и свинцовых труб. Шероховатость этих труб практически не увеличивается в ходе эксплуатации, если жидкость — вода. Расчеты можно производить, с небольшим запасом, по формуле (6—3), также и по другим формулам гладких труб, поскольку эти формулы дают почти совпадающие результаты.

По Ф. А. Шевелеву²¹, сопротивление асбестоцементных труб тоже не увеличивается в эксплуатации, что указывает на их хорошие гидравлические качества.

Гораздо сложнее стоит вопрос о сопротивлении стальных и чугунных труб. Как известно, шероховатость увеличивается в эксплуатации. Обработка опытов Ф. А. Шевелева⁷ показывает, что новые стальные трубы имеют абсолютную шероховатость в среднем $\Delta = 0,03$ мм и новые чугунные $\Delta = 0,1$ мм; трубы в эксплуатации, стальные и чугунные (Московская водопроводная сеть) — $\Delta = 0,45$ мм. По данным С. Я. Вартазарова²², абсолютная шероховатость может достигнуть величины нескольких мм. Исследование Г. М. Мурина²³ показывает, что шероховатость труб увеличивается не только в ходе эксплуатации, но и вследствие коррозии при хранении на складе.

Кольбрук и Уайт²⁴ представили увеличение шероховатости в виде

$$k_s = \alpha t, \quad (7-1)$$

причем коэффициент a зависит от жесткости воды. Выяснилось, что a изменяется в очень широких пределах: $a = 0,0025 - 0,08$ дюймов в год. Опытных данных для установления зависимости типа (7—1) пока еще недостаточно.

Увеличение сопротивления в процессе эксплуатации происходит за счет образования бугорков на стенке, причем изменяется геометрическая структура шероховатости. Вместе с тем изменяется характер сопротивления в доквadraticной области.

В настоящей работе использованы данные опытов Ф. А. Шевелева^{7, 21} о сопротивлении разных труб: стальных и чугунных (новых и старых), а также асбестоцементных.

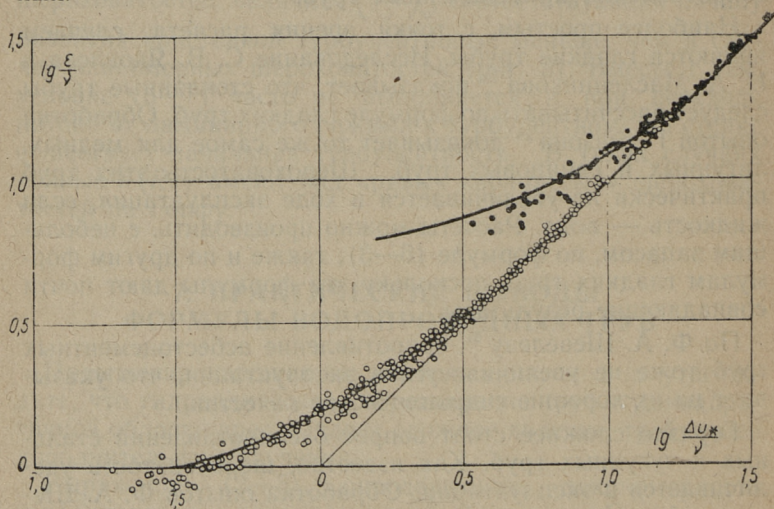


Рис. 11.

Абсолютная шероховатость подсчитана по формуле (1—7), исходя из сопротивления в quadraticной области. Значения $\lambda_{кв}$ определены Ф. А. Шевелевым. Эти значения приняты нами за основу во всех случаях, за исключением одного: в случае новой чугунной трубы с диаметром 301 мм, где величина $\lambda_{кв} = 0,0202$ определена Ф. А. Шевелевым ошибочно, так как измерения не охватывают quadraticную область. В данном случае принята величина $\lambda_{кв} = 0,0187$, установленная путем сопоставления с остальными новыми чугунными трубами.

По формуле (2—2) подсчитаны значения $\frac{\varepsilon}{\nu}$ и составлены соответствующие графики. В качестве примера на рис. 11 изображено развитие пристенной турбулентности в случае новых (нижняя кривая) и бывших в эксплуатации (верхняя кривая) стальных труб. В ходе эксплуатации, вместе с увеличением шероховатости Δ , наблюдается также и изменение ее структуры. Доквадратичная область расширяется. Трубы, бывшие в эксплуатации, не имеют области гладкой трубы. При переходе от ламинарного движения к турбулентному, на стенке образуется начальная турбулентность: $\frac{\varepsilon}{\nu} > 1$. Вместе с тем, начало квадратичной области отодвигается направо. Величина $\left(\frac{\Delta u_*}{\nu}\right)_1$ для старых труб примерно в 4 раза больше, чем для новых. При равных абсолютных шероховатостях сопротивление старых труб в доквадратичной области больше, чем новых.

Примерно то же самое наблюдается в случае чугунных труб, с той разностью, что даже новые чугунные трубы не имеют области гладкой трубы. Эта область существует однако в случае асбестоцементных труб.

При установлении аналитического выражения, описывающего сопротивление в доквадратичной области, мы исходили из соображения, что желательно установить четкие пределы этой области. Поэтому мы отказались от построения формул типа формулы Кольбрука ²⁵

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

согласно которой область гладкой трубы имеет место только при $k_s = 0$, а квадратичная область — при $Re = \infty$.

Обработка опытов показывает, что показатель турбулентности в доквадратичной области может быть представлен с достаточной точностью простым выражением

$$\frac{\varepsilon}{\nu} = a + m \frac{\Delta u_*}{\nu}, \quad (7-3)$$

т. е. в виде прямой (2) на рис. 2. При этом, для неравномерной шероховатости всегда $m < 1$ и $a > 0$. Пересечение с прямой по (2—3) определяет начало доквадратичной области:

$$\left(\frac{\Delta u_*}{\nu}\right)_0 = \frac{1-a}{m}. \quad (7-4)$$

Начало квадратичной области определяется пересечением прямой по (7—3) с прямой по (2—4):

$$\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_1 = \frac{a}{1-m}. \quad (7-5)$$

В нижеследующей таблице 2 приводятся численные значения коэффициентов и пределов доквадратичной области.

Таблица 2

Наименование труб	a	m	$\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_0$	$\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_1$	$\lg\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_0$	$\lg\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_1$
Новые стальные	0,72	0,83	0,337	4,23	1,53	0,63
Стальные в эксплуатации	5,1	0,71	-5,77	17,59	—	1,25
Новые чугунные	7,1	0,6	-10,17	17,75	—	1,25
Чугунные в эксплуатации	11,0	0,51	-19,61	22,45	—	1,35
Новые асбестоцементные	0,75	0,77	0,325	3,26	1,51	0,51

Отрицательные значения $\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_0$ не имеют физического смысла, они получаются путем экстраполяции формулы (7—3) в ламинарную область, где эта формула не действительна. Поэтому, отрицательное значение $\left(\frac{\Delta u_*}{v}\right)_0$ указывает лишь на отсутствие области гладкой трубы.

Подстановка (7—3) в (2—2) определяет закон сопротивления в доквадратичной области:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} - 2 \lg \frac{r}{A} = 0,7 + 2 \lg \frac{\frac{\Delta u_*}{v}}{a + m \frac{\Delta u_*}{v}}. \quad (7-6)$$

На рис. 12 изображены кривые по (7—6) для всех рассмотренных шероховатостей, с коэффициентами согласно таблице 2. Там же представлены пересчитанные согласно нашей методике кривые Г. А. Мурина²³ и Кольбука²⁵. Как видно, кривые, относящиеся к новым асбестоцементным и стальным трубам, почти совпадают. Очень близко к

этим кривым расположена кривая Г. А. Мурина, немного ниже — кривая Кольбрука. Все указанные кривые расположены значительно выше кривых старых труб. Из вышесказанного следует, что формула Кольбрука (7—2), рекомендуемая часто как универсальная, не может быть использована для расчета водопроводных труб в эксплуатации. Номограмма Г. А. Мурина применима для паро-

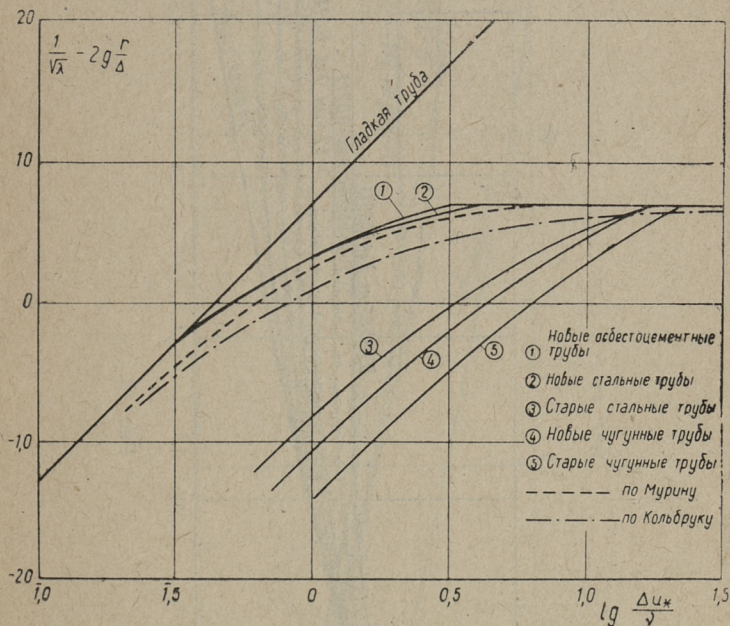


Рис. 12.

проводов и воздухопроводов, в соответствии с условиями проведения опытов.

Закономерность (7—6) можно представить также и в координатах $\lg(100\lambda) - \lg Re$. Сопоставление полученных результатов с опытами Ф. А. Шевелева представлено на рисунках: рис. 13 — новые стальные трубы, рис. 14 — новые чугунные трубы и рис. 15 — новые асбестоцементные трубы. Совпадение получается вполне удовлетворительным, что позволяет рекомендовать формулу (7—6) для практических расчетов.

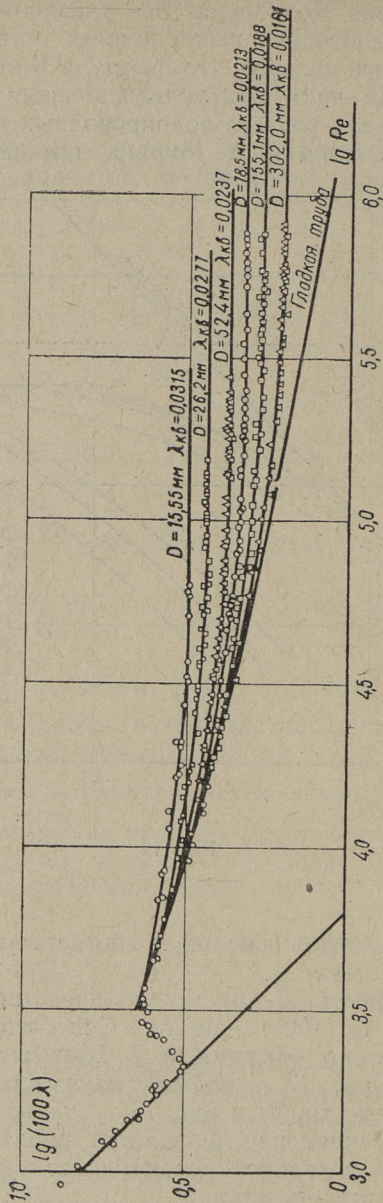


Рис. 13.

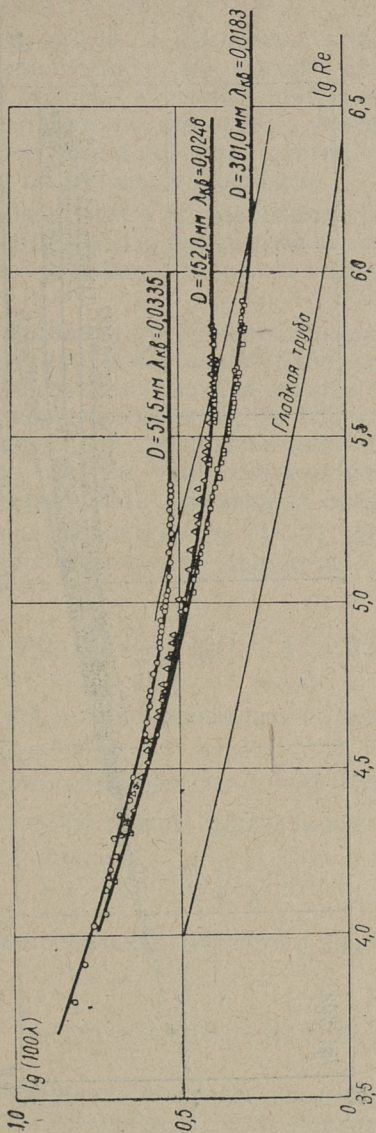


Рис. 14.

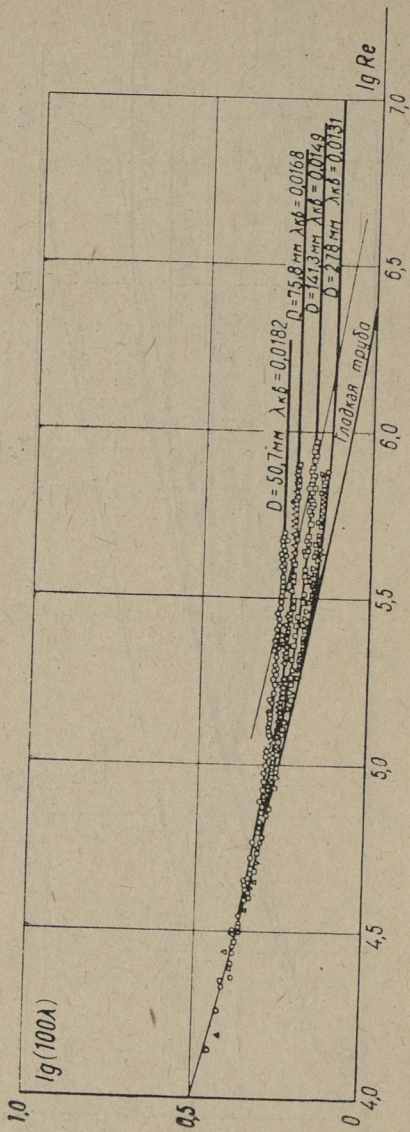


Рис. 15.

Следует еще остановиться на вопросе о подборе надлежащей величины абсолютной шероховатости Δ , фигурирующей в формулах (7—6) и (1—7).

Пользуясь данными Ф. А. Шевелева, можно принять в виде средних значений для новых стальных труб $\Delta = 0,03$ мм и для новых чугунных труб $\Delta = 0,1$ мм. При этом следует учесть, что шероховатость увеличивается уже при хранении на складе и поэтому понятие «новой» трубы имеет несколько произвольный характер.

Новые асбестоцементные трубы имеют среднюю шероховатость $\Delta = 0,012$ мм. По сравнению с металлическими трубами применение асбестоцементных труб вполне оправдано.

Для характеризования труб, находившихся длительное время в эксплуатации, в настоящей работе использованы данные натуральных измерений потерь напора в Московских трубопроводах, произведенные Ф. А. Шевелевым. Наибольшая установленная эквивалентная шероховатость имеет размер $k_э = 1,51$ мм, чему соответствует $\Delta = 0,45$ мм. Эта величина может быть принята за основу расчетов.

Формулу квадратичной области (1—7), которая является видоизмененной формулой Прандтля³, можно переписать в виде

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

причем величину A_1 можно определить по вышеуказанным значениям Δ .

Предел применимости формулы (7—7) установлен величиной $\left(\frac{\Delta u_*}{\nu}\right)_1$, которую можно выразить как

$$\left(\frac{\Delta u_*}{\nu}\right)_1 = \frac{\Delta}{\nu} \sqrt{\frac{\lambda_{кв}}{8}} V_1, \quad (7-8)$$

откуда получена предельная скорость в виде

$$V_1 = \sqrt{8} \frac{\left(\frac{\Delta u_*}{\nu}\right)_1}{\Delta} \nu (A_1 + 2 \lg D) = A_2 + A_3 \lg D. \quad (7-9)$$

Значения коэффициентов приводятся в нижеследующей таблице 3; при определении A_2 и A_3 принималась температура воды $t = 10^\circ$.

Наименование труб	Δ мм	$\left(\frac{\Delta u_*}{\nu}\right)_1$	A_1	A_2	A_3
Новые стальные	0,03	4,23	5,14	267	104
Стальные в эксплуатации	0,45	17,59	2,79	40,1	28,7
Новые чугунные	0,1	17,75	4,10	268	131
Чугунные в эксплуатации	0,45	22,45	2,79	51,2	36,7
Новые асбестоцементные	0,012	3,26	5,94	593	200

В доквadraticной области, т. е. при $V < V_1$ следует пользоваться формулой (7—6), которую можно преобразовать в

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0,7 - 2 \lg(2m\Delta) + 2 \lg D - 2 \lg \left(1 + \frac{av\sqrt{8}}{m\Delta V\sqrt{\lambda}}\right). \quad (7-10)$$

Для труб в эксплуатации, эта формула принимает вид: для стальных труб

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 3,09 + 2 \lg D - 2 \lg \left(1 + \frac{5,87}{V\sqrt{\lambda}}\right), \quad (7-11)$$

для чугунных труб

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 3,38 + 2 \lg D - 2 \lg \left(1 + \frac{17,62}{V\sqrt{\lambda}}\right). \quad (7-12)$$

Пользуясь формулами (7—7), (7—9), (7—11) и (7—12), следует выразить диаметр трубы D в см. Предельная скорость по (7—9) получается в см/сек.

При $D = 1$ см коэффициент A_2 выражает предельную скорость в см/сек. Как видно по табличным данным, все новые трубы работают практически всегда в доквadraticной области; значения коэффициентов шероховатости для таких труб, приводимые в разных шкалах, теряют смысл.

На рис. 16 изображена зависимость предельных скоростей от диаметра для труб в эксплуатации; график построен по формуле (7—9). Как видно, в работе водопро-

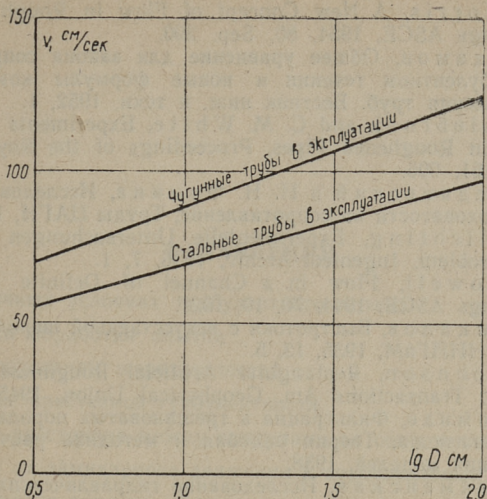


Рис. 16.

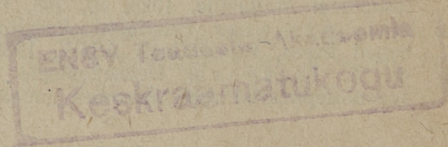
водных сетей могут встречаться как квадратичная, так и доквадратичная области сопротивления, что отмечается также и в работе Ф. А. Шевелева ⁷.

Ввиду неудобства подсчетов по формулам (7—11) и (7—12), необходимо в дальнейшем разработать соответствующие графики и таблицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Nikuradse, Strömungsgesetze in rauhen Röhren, VDI — Forschungsheft, 1933, 361.
2. Л. А. Тепакс, Граничные условия турбулентного потока при обтекании шероховатых стенок, Труды ТПИ, 1956, А-78.
3. Сборник: Проблемы турбулентности, 1936.
4. L. Hopf, Die Messung der hydraulischen Rauigkeit, ZAMM, 1923, 3, 329.
5. A. H. Gibson, The Flow of Water in a Corrugated Pipe, Philosophical Magazine, 1925, 50, 295, 199.
6. V. L. Streeter, Frictional Resistance in Artificially Roughened Pipes, Proceedings ASCE, 1935, 2, 163.
7. Ф. А. Шевелев, Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах, 1953.

8. H. N. Morris, A New Concept of Flow in Rough Conduits, Proceedings ASCE, 1954, 80, Sep. 390.
9. Г. А. Адамов, Общее уравнение для закона сопротивления при турбулентном течении и новые формулы коэффициента сопротивления труб. Вестник инж. и техн. 1952, 1.
10. C. F. Colebrook and C. M. White, Experiments with Fluid Friction in Roughened Pipes, Proceedings of the Royal Society, 1937, A-161, 906.
11. К. К. Федяевский и Н. Н. Фомина, Исследование влияния шероховатости на сопротивление, Труды ЦАГИ, 1940, 441.
12. H. Schlichting, Experimentelle Untersuchungen zum Rauheitsproblem, Ingenieur-Archiv, 1936, 7, 1.
13. R. W. Powell, Flow in a Channel of Definite Roughness, Proceedings ASCE, 1944, 70, 10, 1521.
14. Ф. И. Пикалов, Быстротки с искусственной шероховатостью, Труды ВНИИГиМ, 1935, 13, 5.
15. J. W. Johnson, Rectangular Artificial Roughness in Open Channels, Transactions Am. Geophysical Union, 1945, 6, 906.
16. Г. М. Ломизе, Фильтрация в трещиноватых породах, 1951.
17. А. П. Зегжда, Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей, 1938.
18. Н. С. Знаменская, Исследование гидравлических сопротивлений русла при грядовом движении наносов. Автореферат канд. диссертации, Ленинградский Политехн. институт, 1956.
19. С. В. Яковлев, Н. А. Масленников, Исследование гидравлического сопротивления стеклянных труб, Стр. ин-тут Мосгорисполкома, Сб. Санитарная техника, 1953.
20. G. Viesohn, Untersuchungen über Druckhöhenverluste in Rohrleitungen und Armaturen für die Hausleitungen der Wasserversorgung, Das Gas- und Wasserfach, 1932, 34, 679.
21. Ф. А. Шевелев. Гидравлический расчет асбестоцементных труб, 1954.
22. С. Я. Варгазаров, Бактериальная коррозия металлических напорных трубопроводов, Гидротехническое строительство, 1950, 10, 25.
23. Г. А. Мурип, Гидравлическое сопротивление стальных труб, Известия ВТИ, 1948, 10.
24. C. F. Colebrook and C. M. White, The Reduction of Carrying Capacity of Pipes with Age, Journal Inst. Civil Engineers, 1937, 1, 99.
25. 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.



ОГЛАВЛЕНИЕ

1. О граничных условиях турбулентного потока	3
2. Методика обработки опытов	5
3. О классификации шероховатостей	7
4. Развитие пристенной турбулентности	9
5. Влияние расстояния между выступами на сопротивление	13
6. Переход от ламинарного движения к турбулентному	15
7. Практические выводы. Формулы водопроводных труб	20
Литература	31

Тепакс Лео Андроникович

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРУБ В ДОКВАДРАТИЧНОЙ
ОБЛАСТИ

Эстонское Государственное Издательство
Таллин, Пярну маантээ 10

*

Редактор Х. Вельнер

Технический редактор А. Сепп

Корректор Н. Круглова

Сдано в набор 3 XII 1956. Подписано к печати 21 XII 1956. Бумага 54x84, 1/16. Печатных листов 2,0. По формату 60x92 печатных листов 1,45. Учетно-издательских листов 1,38. Тираж 800. МВ-09425. Заказ № 7254.

Типография «Коммунист», Таллин, ул. Пикк, 2.

Цена 1 руб.

Цена 1 руб.

EESTI AKADEEMILINE RAAMATUKOGU



1 0200 00086397 1