

УДК 532.5 (075.8)

А.Л. ЛУКС

кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и теплотехники Самарский государственный архитектурно-строительный университет

Е.А. КРЕСТИН

кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и теплотехники Самарский государственный архитектурно-строительный университет

М.В. ШУВАЛОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, декан факультета инженерных систем и технологий Самарский государственный архитектурно-строительный университет

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВОЛНИСТО-ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ТЕПЛОТДАЧУ ПРИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЯХ ПОТОКА ЖИДКОСТЕЙ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ТРУБАХ

ANALYSIS OF CORRUGATED AND UNEVEN SURFACE INFLUENCE ON HYDRAULIC RESISTIVITY AND HEAT EMISSION FOR TURBULENT CURRENTS OF LIQUID FLOW IN INDUSTRIAL PIPES

Исследуются особенности влияния волнисто-шероховатых поверхностей труб и каналов на увеличение гидравлического сопротивления и теплоотдачи при турбулентном течении жидкости. В автономной зоне сопротивление труб не может быть найдено при помощи только одного геометрического параметра (эквивалентной высоты бугорков шероховатости), характерного для равнотекучей (песчаной) шероховатости. Для теоретического и экспериментального исследования возникающих волновых движений потока жидкости в трубах предлагается использовать несколько геометрических параметров (d/D , t/D и др.). Обобщаются способы и результаты моделирования волновых движений при помощи различных турбулизаторов пристеночного слоя (поперечных канавок, ребер, проволочных колец и спиралей) и специального «тонкого» инструментария. Выявлены основные воздействия волнисто-шероховатых поверхностей трубы на изменение структуры пристеночной области турбулентного потока жидкости. Даны практические рекомендации для измерения гидравлических сопротивлений труб в инженерных сетях.

Ключевые слова: волнисто-шероховатая поверхность, элементы шероховатости, гидравлическое сопротивление, труба, поток жидкости, турбулентное течение, турбулизаторы, области гидравлических сопротивлений.

Features of corrugated and uneven surface of pipes and grooves and their influence on hydraulic resistivity and heat emission for turbulent currents of liquid flow are analyzed. In autonomous area the resistivity of pipes cannot be found by using a single geometric parameter (equivalent height of roughness peaks), which is typical for even-granular, or sandy unevenness. It is proposed to use several geometrical parameters (d/D , t/D , etc.) for theoretical and experimental study of occurring wave moves in the liquid flow in pipes. Methods and results for modeling wave motions by using different turbulence creators for wall layers (i.e. diametrical grooves, wire ruts and spirals) and precise instruments. Main influence of corrugated and uneven pipe surfaces on structure changes in the wall layers of fluid flow was identified. Practical guidelines for measurements of hydraulic resistivity of the pipes in engineering networks and systems are described.

Keywords: corrugated and uneven surfaces, components of unevenness, hydraulic resistivity, liquid flow, turbulent current, turbulence creators, flow resistance areas.

В 1883 г. английский физик О. Рейнольдс неустановившееся движение жидкости с перемешиванием потока в пределах поперечного сечения трубы первоначально описал как волнистое. Позднее это движение было названо турбулентным (*turbulentus* – вихревой). При турбулентном режиме коэффициент гидравлического трения имеет большее значение, чем для ламинарного режима при тех же числах Рейнольдса $Re=Vd/\nu$, где V – средняя скорость потока жидкости; d – диаметр трубы; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Турбулентное движение жидкости над подвижными и жесткими волнисто-шероховатыми поверхностями изучено в небольшом объеме [1-8]. Это касается как трубопроводных сетей, так и гидравлических сооружений.

В гидравлике рассматривается искусственная равнозернистая шероховатая поверхность (по опытам И. Никурадзе), а также неравнозернистая поверхность напорных трубопроводов и открытых каналов. В промышленных трубах неравнозернистую шероховатость называют технической. Она отличается разновысокими и неравномерно расположенными бугорками (или элементами) шероховатости. Однако поверхность труб может быть еще и волнистой с различными высотами и длинами волн (или микроволн). В зависимости от технологии изготовления в системах ХВС, ГВС, ТГВ в трубах может наблюдаться и регулярная шероховатость (гофрированные, синтетические, дренажные системы и др.). Последние также образуют волнисто-шероховатую поверхность.

Например, при помощи пластмассовых гофрированных труб осуществляется подводка к радиаторам отопления Uronog MLC, для водопроводной разводки в системах водоснабжения Uronog rex, в системах RAUTITAN his и др.

В энергетических и технологических установках применяются гибкие сильфонные трубы из тонкой нержавеющей стали, работающие под высоким давлением жидкостей и газов. Поэтому возникает необходимость оценить влияние волнисто-шероховатых поверхностей на гидравлические сопротивления, пропускную способность труб и на теплоотдачу от них.

В инженерной практике используются и другие виды шероховатостей с выступами (впадинами) различных размеров по трем координатам и с раз-

личным взаимным расположением элементов шероховатостей. Они, с одной стороны, влияют на структуру течения пристеночного слоя, профиль скоростей, с другой – на гидравлическое сопротивление при движении жидкостей.

Рассмотрим поверхность, имеющую шероховатость в виде прямоугольных брусков с размерами h , w , L (высота, ширина, длина). Область вблизи стенки будем называть слоем шероховатости. Толщина этого слоя предварительно определяется так:

$$y/h < 2 \quad \text{и} \quad \frac{y}{y_f} < 30,$$

где y – расстояние от стенки; h – высота бруска; y_f – безразмерное расстояние.

В общем случае среднее течение в слое шероховатости является трехмерным $U=U(x,y,z)$. Вблизи стенки возможно существование двумерного течения, а неустойчивость приводит к возникновению ячеистого трехмерного течения в пространстве между брусками. При обтекании элементов шероховатости возникает множество отрывных течений, а также течений с повторным присоединением к твердой стенке с возможным образованием концентрированных вихрей.

Характер этих течений в значительной мере зависит от геометрии поверхности, которая определяется соотношениями y_f/h , w/h и L/h , где $y_f = \nu/U_f$ и $U_f = \sqrt{\tau_w/\rho}$ – динамическая скорость потока жидкости.

При волнисто-шероховатой поверхности определенной геометрии невозможно указать единственный размер шероховатости, определяющий характеристики трения или масштаб логарифмического слоя, как это имеет место в случае зернисто-песчаной шероховатости. Другими словами, нельзя назвать единственную характеристику различных структур шероховатости, которая бы полностью определяла ее влияние на внешнее течение и трение в трубах и каналах. Не существует единственной статистической характеристики (например, среднеквадратичного значения высоты бугорков, выступов или впадин шероховатостей), адекватно коррелирующей эффект шероховатости и связанных с ней волновых процессов и турбулентности.

Шероховатая поверхность чутунных труб (как новых, так и бывших в эксплуатации) была исследо-

вана Ф.А. Шевелевым в середине XX в. [7]. Внутренняя поверхность этих труб также может быть отнесена к волнисто-шероховатой. В исследованиях наряду с измерением коэффициентов сопротивления были получены и профили скоростей. Была установлена особенность таких течений: кривая коэффициентов сопротивления $\lambda = f(\text{Re})$, соответствующая режимам гидравлически гладкой стенки, проходит значительно выше аналогичной кривой для труб гладких, стальных и с зернистой шероховатостью. Соответственно уменьшается и наклон профилей скоростей в полулогарифмических координатах.

Кривые сопротивления для чугунных труб сопрягаются не с кривой для гладких труб, а с другой, более высокой для этих труб кривой. Уравнения кривых, с которыми они сопрягаются в переходной области, Ф.А. Шевелевым были представлены в виде

$$\lambda_{\text{пер}} = \frac{B}{\text{Re}^m}. \quad (1)$$

В случае стальных труб это соотношение преобразуется в формулу коэффициента сопротивления для зоны гладких труб ($\lambda_{\text{пер}} = \lambda_{\text{глад}}$):

$$\lambda_{\text{глад}} = \frac{0,25}{\text{Re}^{0,226}}. \quad (2)$$

Эта приближенная формула дает удовлетворительные результаты для чисел Рейнольдса в пределах до $\text{Re} \approx 10^6$. По данным тех же опытов для чугунных труб была представлена уже другая формула:

$$\lambda_{\text{пер}} = \frac{0,77}{\text{Re}^{0,284}}. \quad (3)$$

Эта зависимость дает увеличение сопротивления волнисто-шероховатой поверхности чугунных труб, т. е. учитывает влияние их волнового сопротивления.

Коэффициенты сопротивления кольцевых каналов в диапазоне $\text{Re} = 4000 - 320000$ зависят только от Re и для $\text{R}_1 \geq 0,0625$ не зависят от отношения радиусов каналов. При определении λ по эквивалентному диаметру для кольцевых каналов коэффициент Дарси на 1-10 % выше, чем для гладкой трубы, а при турбулентном течении коэффициент удовлетворительно описывается зависимостью

$$\lambda = 0,348 \text{Re}^{-0,25}. \quad (4)$$

На рис. 1 представлены кривые сопротивления для новых стальных труб (без стыков), на рис. 2 – то же для новых чугунных труб (нормальной длины),

а на рис. 3, 4 и 5 – результаты исследований новых чугунных труб с диаметрами $d = 51,5; 152,0$, а также с учетом увеличения их сопротивления в процессе эксплуатации.

Для стальных и чугунных труб кривые сопротивления являются ниспадающими с ростом Re . Причем при относительно больших (различных для каждого диаметра труб) значениях Re они достигают области квадратичного сопротивления. При относительно малых значениях Re кривые сопротивления для стальных труб сопрягаются с кривой сопротивления для гладких труб, приближающихся к шероховатости технически гладких труб. К результатам опытов Ф.А. Шевелева [7] близки данные Г.А. Мурина.

Различный характер кривых сопротивления новых стальных и чугунных труб с технической шероховатостью стенки, т. е. с неравномерно расположенными разновысокими выступами, связан с проявлением значительного лобового сопротивления и эффекта "затенения" при обтекании жидкостью указанных выступов.

Помимо вязкого трения в пристеночной области труб с технической шероховатостью все более сильно проявляется аэродинамическое (лобовое) сопротивление выступов шероховатости.

Ф.А. Шевелев [7] получил следующие формулы для граничной кривой, разделяющей переходную и квадратичную области:

для новых стальных труб (без стыков)

$$\lambda_{\text{кв}} = \frac{0,335}{\text{Re}^{0,226}}; \quad (5)$$

для новых чугунных труб (нормальной длины)

$$\lambda_{\text{кв}} = \frac{0,959}{\text{Re}^{0,284}}. \quad (6)$$

Он не использовал термин волнисто-шероховатой поверхности при исследовании как новых, так и бывших в эксплуатации чугунных труб. Однако им приведены восходящие кривые сопротивления не только для труб с обычной неравномерной шероховатостью, но и для таких, на гладкой поверхности стенки которых располагаются одинаковые по величине элементы шероховатости одинакового размера, т. е. как для труб с регулярной шероховатостью. Здесь же приведена кривая сопротивления для той же трубы ($d = 52,4$ мм), но без регулярной шероховатости.

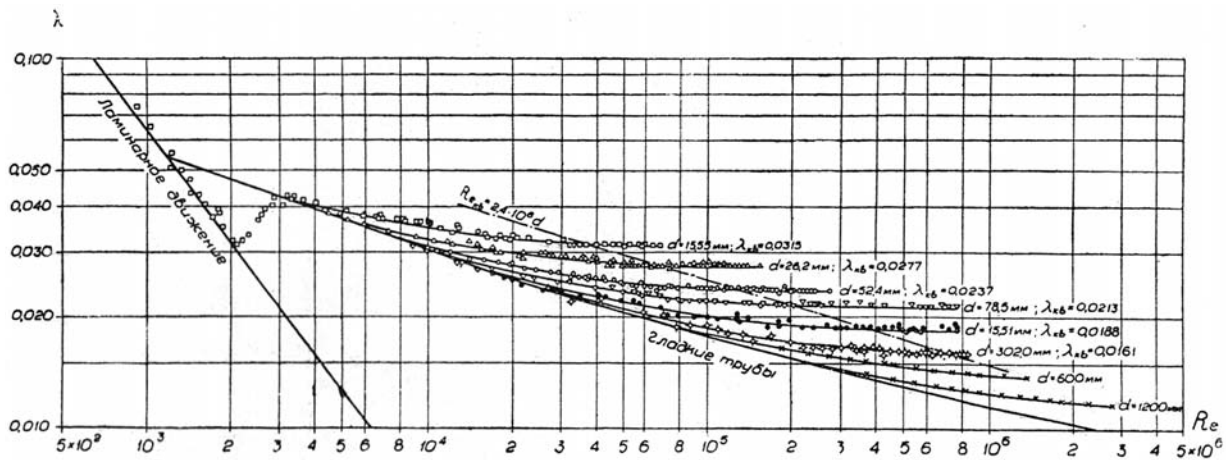


Рис. 1. Кривые сопротивления для новых стальных труб (без стыков)

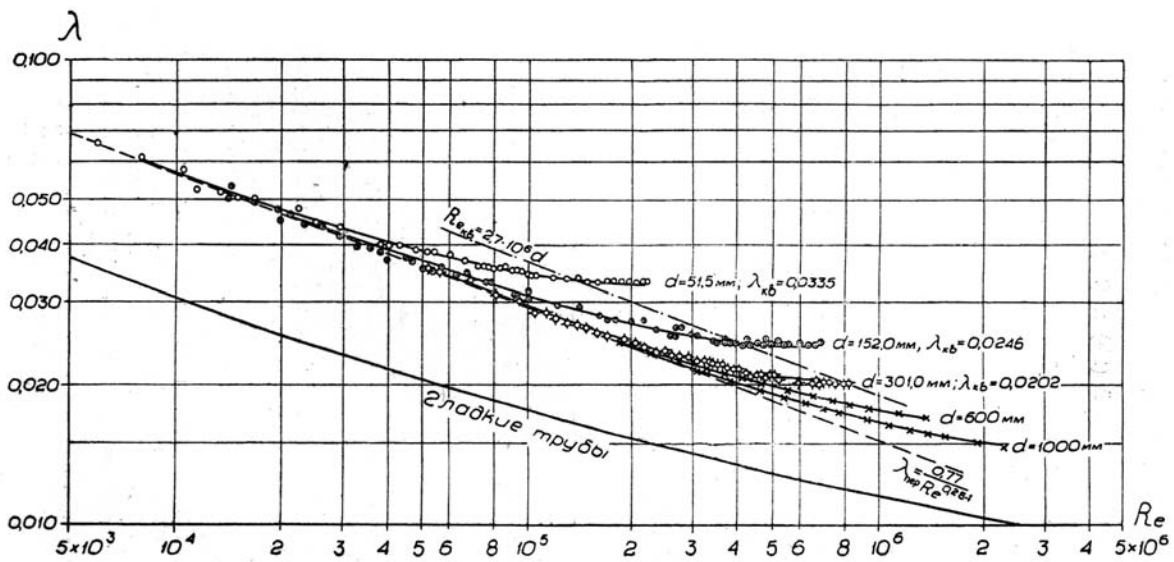


Рис. 2. Кривые сопротивления для новых чугунных труб нормальной длины [7]

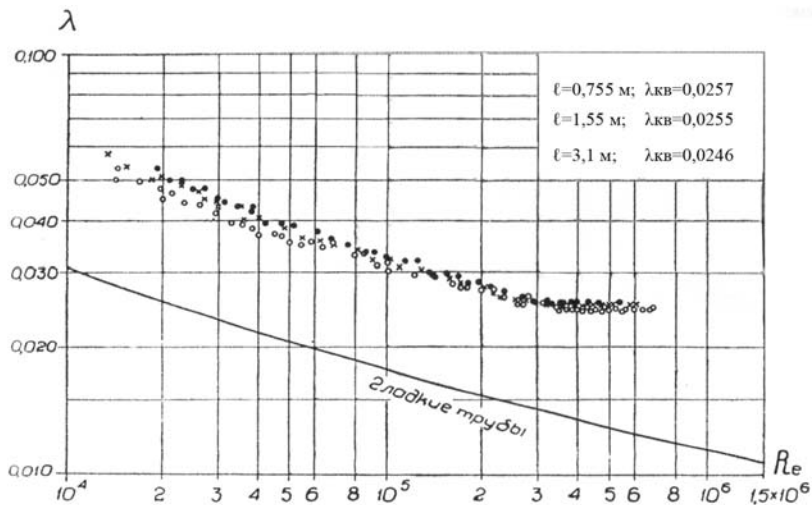


Рис. 3. Сопротивление новых чугунных труб $d = 152$ мм различной длины

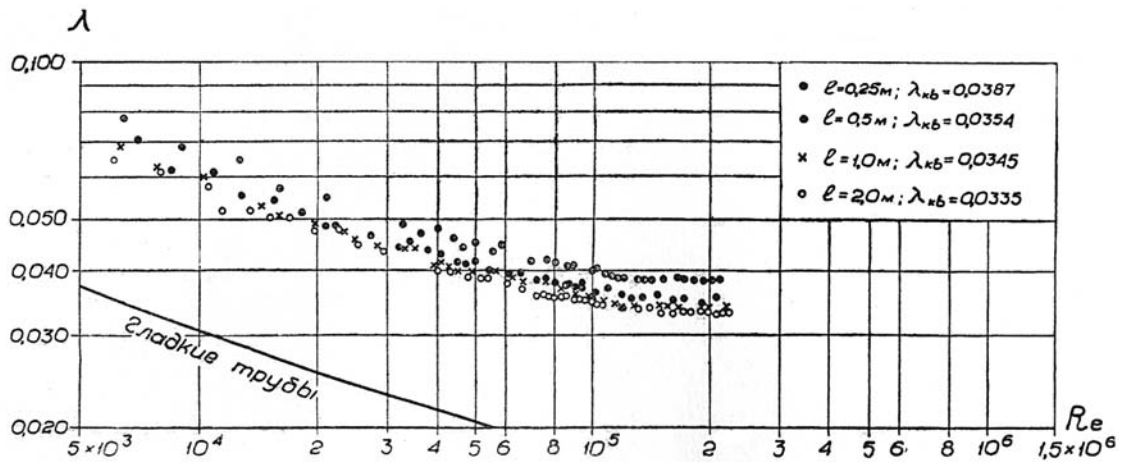


Рис. 4. Сопротивление новых чугунных труб $d = 51,5$ мм различной длины [7]

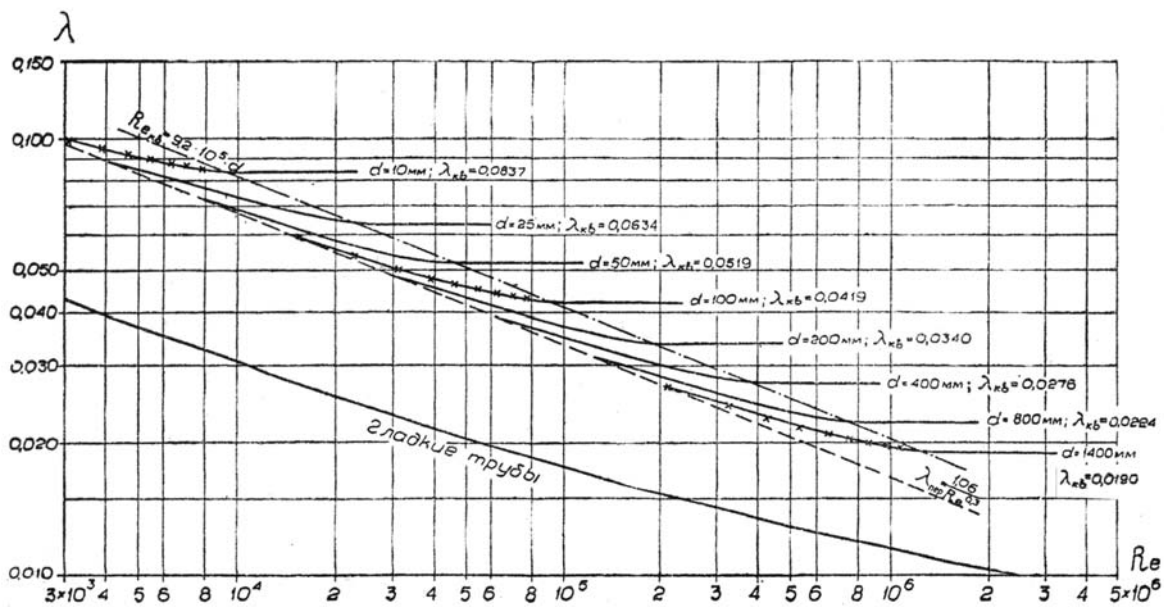


Рис. 5. Кривые $\lambda = f(Re)$ для стальных и чугунных водопроводных труб с учетом увеличения их сопротивления в процессе эксплуатации [7]

Как показывает анализ, при увеличении регулярной шероховатости кривые сопротивления с понижением Re остаются восходящими. Это же явление наблюдается и в стальных трубах со сварными стыками. Здесь кривые сопротивления также являются восходящими и не сопрягаются с кривой Блазиуса для гладких труб. Это значит, что в переходной области при наличии различных турбулизаторов сопротивление увеличивается сверх того значения, которое имеет место при квадратичном законе сопротивления (области развитой шероховатости). При проектировании трубопроводов использование формул для квадратичной зоны со-

противления приводит не к запасу потерь напора в трубах, а к их занижению. Закономерности сопротивления в переходной области для промышленных труб не могут быть приравнены к закономерностям для труб с равномерной (песчаной) шероховатостью по Никурадзе, а должны корректироваться.

Ф.А. Шевелев [7] рассматривал сварной стык как диафрагму, сопротивление которой эквивалентно сопротивлению стыка. Однако влияние возникающих волновых движений потока жидкости в экспериментах им детально не изучалось. При сварке стальных труб внутри труб образуются наплывы металла (сварной шов). Высота сварного шва

зависит от технологии сварки и может достигать до 5-6 мм. При наличии сварных швов сопротивление труб заметно увеличивается. С ним связана и частота их расположения. При этом кривая сопротивления в переходной области по мере уменьшения расстояния между сварными швами все более отходит от кривой для гладких труб. Влияние сварных швов при одном и том же расстоянии между ними растет с уменьшением диаметра труб.

Для специальных видов шероховатости труб (рис. 6) имеют место особые (разнообразные) формы кривых сопротивления. К ним также относятся резиновые рукава различных типов: 1) армированные внутри стальной спиралью, соприкасающиеся с протекающей по рукаву жидкостью; 2) неармированные; 3) армированные рукава со спиралью, заключенной внутри стенки.

Для резиновых рукавов с зубчатой внутренней поверхностью (первый тип) зависимость $\lambda=f(\text{Re})$ выражается прямыми, параллельными оси абсцисс. Это характерно (рис. 6 а) при квадратичном сопротивлении труб (автомодельная область сопротивления). При этом сопротивление возрастает с увеличением диаметра рукавов из-за увеличения высоты внутренних рубцов.

Неармированные рукава под воздействием внутреннего давления жидкости деформируются, и их внутренняя поверхность становится волнистой. Причем характер волнистости у различных типов рукавов бывает различным. Из рис. 6 б видно, что восходящие кривые сопротивления для рукавов с волнистыми стенками не отличаются от кривых сопротивления для труб с обычной неравномерной шероховатостью.

На рис. 6 в, г даны результаты опытов с резиновыми рукавами условного диаметра 65 и 100 мм, внутри стенок которых имелась стальная спираль. Под влиянием внутреннего давления стенки рукава выгибались, образуя дополнительную шероховатость в виде рубцов, расположенных также по спирали с определенным относительным шагом. Внутренняя поверхность стенок этих рукавов, гладкая при атмосферном давлении, становилась все более волнисто-шероховатой по мере увеличения давления, т.е. она становилась подвижной волнисто-шероховатой поверхностью.

С изменением подвижной волнисто-шероховатой поверхности трансформировались и кривые

сопротивления. Наблюдается отход от горизонтальных кривых сопротивления, характерных для квадратичной зоны. Из анализа вытекает, что при равных величинах эквивалентной абсолютной шероховатости d_{Σ} (или K_{Σ}) кривые для различных типов волнисто-шероховатых труб имеют свою форму. Однако сама величина d_{Σ} не определяет форму кривых сопротивления, как ошибочно полагали исследователи в этой области. Кривые сопротивления не в полной мере увязаны с относительной высотой, относительным шагом расположения элементов волнистых шероховатостей, с технологией их изготовления, с изменением формы элементов шероховатостей, с изучением структуры пристеночного течения (вязкого подслоя, буферного слоя и внешнего слоя, а также турбулентного ядра потока) и с механизмом турбулентности.

По-видимому, сопротивление промышленных труб непосредственно после их прокладки является неодинаковым вследствие различия технологий при производстве строительно-монтажных работ (особенно стыковых соединений).

По Шевелеву [7], среднее значение коэффициента λ в зависимости $\lambda=f(\text{Re})$ для стальных труб, бывших в эксплуатации от 6 до 15 лет, составляет 0,0204, а для чугунных труб - 0,0212. Однако чугунные трубы, как новые, так и бывшие в эксплуатации, имеют волнисто-шероховатую поверхность. В стальных трубах при эксплуатации также образуется волнисто-шероховатая поверхность и сопротивление трубы большого диаметра ($d=900-1200$ мм) имеет восходящий характер (рис. 7) с понижением Re .

Как показывают натурные измерения, для стальных труб характерна не горизонтальная кривая 0,0210, а асимптотическая кривая, которая будет проходить выше кривой для чугунных труб. Другими словами, расчетные значения коэффициента λ не будут одинаковыми. Они зависят от продолжительности эксплуатации ($t \geq 15$ лет). По-видимому, нельзя трубы, бывшие в эксплуатации, сопоставлять с гидравлическим сопротивлением труб с искусственной равнозернистой песчаной шероховатостью с условной крупностью 1 мм, так как в последней элементы шероховатости не могут обладать лобовым сопротивлением, которое наблюдается при неравномерной, разновысокой волнисто-шероховатой поверхности. В них реализуются принципиально различные физические модели обтекания эле-

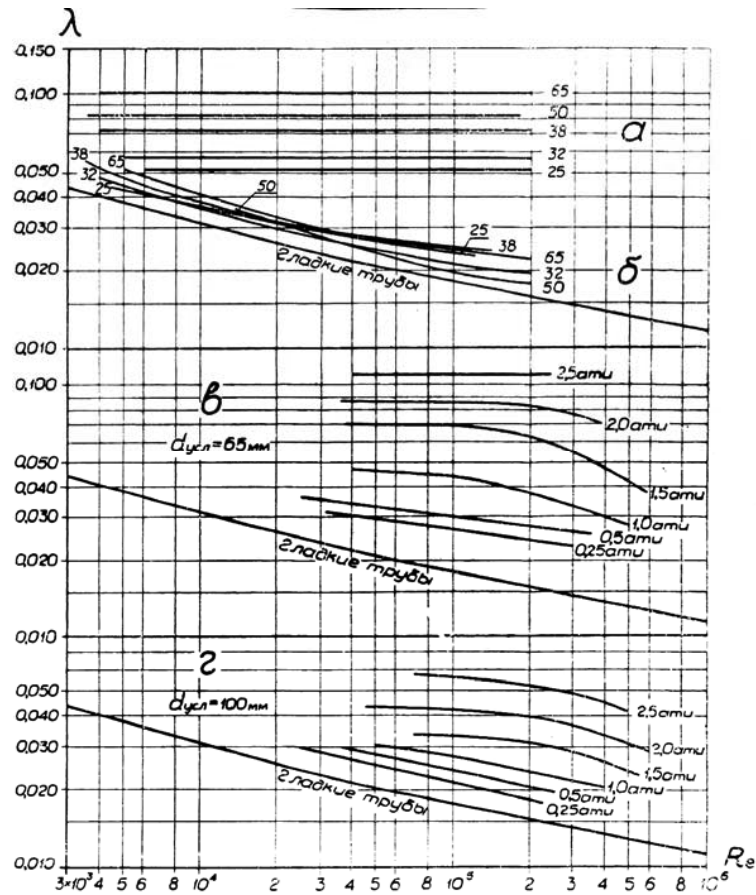


Рис. 6. Кривые сопротивления для резиновых рукавов [7]

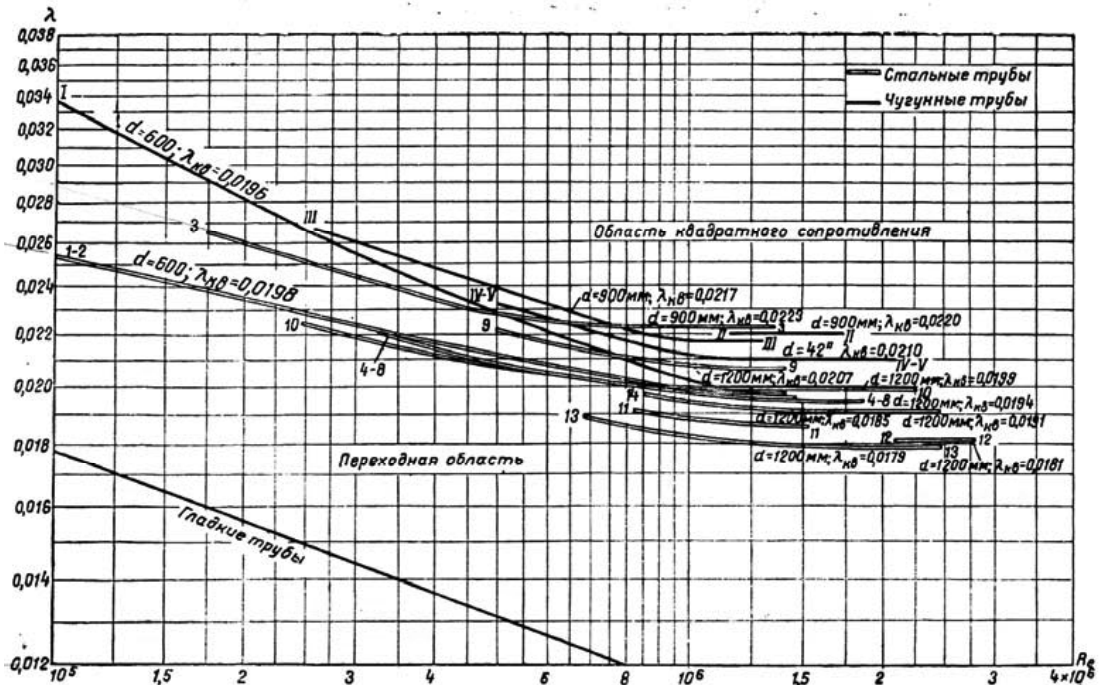


Рис. 7. Кривые сопротивления для стальных и чугунных труб больших диаметров, по данным натуральных измерений [7]

ментов шероховатости, т.е. влияние лобового сопротивления различно.

Для гидравлического расчета труб, работающих в области сопротивления с учетом увеличения коэффициента Дарси в процессе эксплуатации, вместо зависимостей [7]

$$\lambda_{кв} = \frac{A}{d^{0,3}}, \quad (9)$$

где $A=0,021$ – для чугунных труб и $A \approx 0,22$ – для стальных труб,

нужно использовать уточненные зависимости с неизменно большими значениями A вида

$$\lambda_{кв} = \frac{A}{d^{m_2}}, \quad (10)$$

так как для стальных труб нужно принимать во внимание их внутреннее покрытие.

Исследованные стальные трубы, бывшие в эксплуатации от 6 до 15 лет, перед укладкой обрабатываются битумным покрытием. При осмотре внутренней поверхности этих труб после некоторого периода эксплуатации обнаружено, что эти покрытия не являлись долговечными и эффективными против коррозии стенок и подвержены разрушению. Кроме того, не исследовались и возможные отложения на стенках труб.

Как показывает современная практика эксплуатации стальных труб больших диаметров (на примерах Санкт-Петербургского водопровода), стальные трубы более подвержены коррозии, чем чугунные, в процессе эксплуатации. Кроме того, они обладают повышенным гидравлическим сопротивлением.

Сопротивление труб вследствие роста их шероховатости (в том числе с образованием фронта волн) возрастает сравнительно быстро, а затем рост сопротивления значительно замедляется (т.е. для стальных труб принимает асимптотический характер), а не является одинаковым, как считал Ф.А. Шевелев [7]. Это есть проявление естественной шероховатости на стенках трубопроводов.

Как отмечал Шлихтинг [8], при многолетней эксплуатации в водопроводных трубах образовались волнистые отложения с перпендикулярным потоку фронтом волн высотой 0,5 мм при диаметре трубы 500 мм. Они снизили расход воды более чем на 50 %. Только увеличением крупности эквивалентной шероховатости этот эффект объяснить нельзя. Увеличение сопротивления связано, прежде

всего, с влиянием самой волнисто-шероховатой поверхности и новыми механизмами ее взаимодействия с буферной зоной пограничного слоя, с внешним турбулентным ядром (с возникновением и развитием турбулентности).

Расчет увеличения высоты выступов шероховатости в зависимости от срока эксплуатации и состава воды традиционно выполнялся по известной зависимости:

$$K_t = K + \alpha t, \quad (11)$$

где K – высота выступов шероховатости в начале эксплуатации; K_t – то же через t лет; α – коэффициент, характеризующий скорость увеличения выступов K и изменяющийся от 0,025 до 3 мм/год в зависимости от степени минерализации воды и влияния облитерации трубопроводов в процессе эксплуатации в результате коррозии материалов труб, а также образования плотного слоя отложений поперек движения воды.

Зависимость (11) не в полной мере учитывает дополнительное гидравлическое сопротивление поперечного фронта волн в трубе из-за облитерации труб в ходе эксплуатации, которая должна характеризоваться несколькими параметрами (например, d/D , t/D и др.).

Значительное волновое сопротивление трубы обнаружено и в наших экспериментах (А.Л. Лукс, 1981 г.). Эксперименты проводились на трубе с длиной рабочего участка 7,45 м. Расход протекающей воды на участке регулировался задвижкой и определялся объемным способом при помощи мерного бака, а перепад давлений на участке измерялся двумя пьезометрами. В качестве объекта для исследований использовалась водогазопроводная сварная труба (ГОСТ 8732-58) с расчетным диаметром 82 мм и с толщиной стенки 5,5 мм. Труба эксплуатировалась в лабораторных условиях 18 лет. Рабочая часть трубы содержала два сварных стыка на расстоянии 2,1 и 1,32 м от начала и конца рабочего участка соответственно. Отбор давления проводился через отверстия с острой кромкой в стенке трубы ($d=2$ мм). Длина начального участка $l_0=1,6$ м ($l_0/D > 12$).

Как показывают натурные исследования, при длительной эксплуатации на внутренней поверхности промышленных труб постоянно формируются из-за коррозии и отложений «наросы», рубцы, гряды, «коросты» величиной до 3-4 мм. Они порождают ансамбль вихрей

(одномерных, двухмерных, трехмерных) и усиленную мелкомасштабную турбулентность на стенке, которая захватывает буферный слой и внешнее турбулентное течение. На их поддержание затрачивается дополнительная энергия потока, при этом возникает волновое движение в трубах. Оно связано при обтекании элементов шероховатости от сечения к сечению со значительным изменением скорости и давления в ПС. Гидравлическое сопротивление труб резко возрастает, а их пропускная способность падает. Вследствие этого приходится «сдвигать» напорно-расходную характеристику насосов $H-Q$, а это приводит к увеличению напора и расхода и, как следствие, к перерасходу энергии.

Наряду с вязким сопротивлением в пограничном слое усиливается лобовое сопротивление, связанное с обтеканием волнистой шероховатости, увеличиваются турбулентные напряжения из-за перемещения и перемешивания турбулентных молей. Причём последние, как показывают эксперименты, преобладают над вязкими сопротивлениями. При этом существенно изменяется вся структура пристеночного пограничного слоя, а также профиль скоростей в нем. Указанные факторы требуют корректировки

уравнений для описания волнового движения в пристеночном пограничном слое.

Длительная эксплуатация стальной трубы, при которой происходило периодическое «обновление» воды и воздуха, создавала благоприятные условия для образования коррозии и отложений (инкрустации). Как показала серия экспериментов по определению гидравлического трения, в стальной трубе ($D=82$ мм) с течением времени образовалась специфическая волнисто-шероховатая поверхность, обусловленная коррозией и отложениями и не похожая ни на песчаную зернистую, ни на регулярную шероховатость, образованную цилиндриками. Вид и характер этих отложений в трубе значительно изменялся в процессе эксплуатации. Образование отложений происходило в результате сложных химических, физических и биологических явлений, протекающих в стальной трубе. При этом качество транспортируемой воды и длительность эксплуатации трубы оказали решающее влияние на образование, форму и расположение отложений. При эксплуатации промышленных водопроводных сетей такие отложения с образованием фронта, перпендикулярного направлению скорости, распространены в трубах.

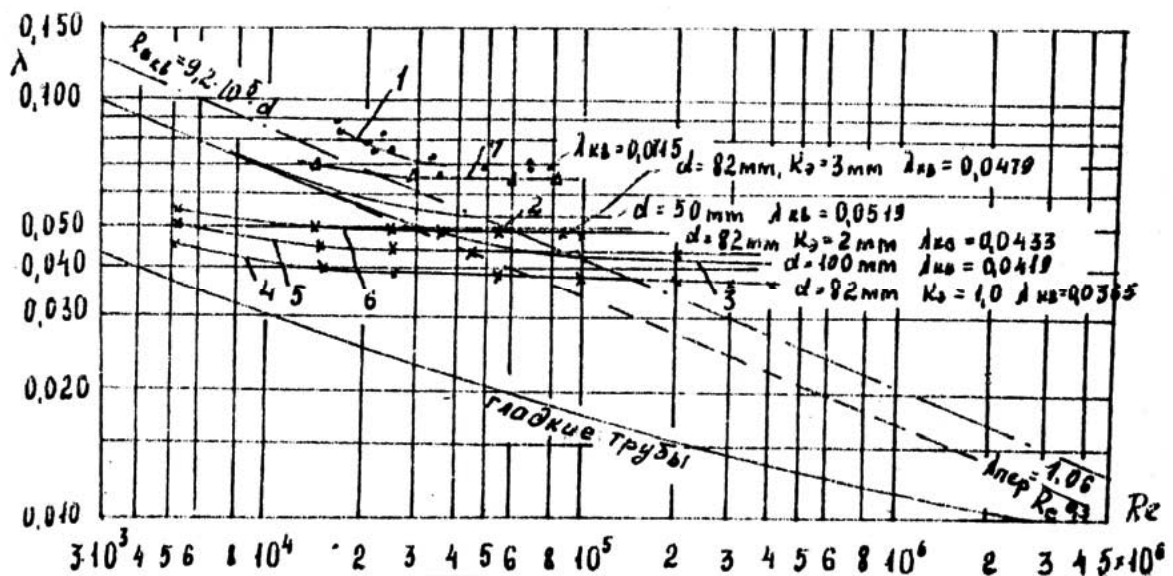


Рис. 8. Зависимость коэффициентов гидравлического трения $\lambda = f(Re)$ стальных труб с учетом увеличения их сопротивления в процессе эксплуатации:

- 1 – экспериментальные точки, водопроводная вода, труба с расчетным диаметром 82 мм, бывшая в эксплуатации 18 лет;
- 2, 3 – по формуле проф. Ф.А. Шевелева для стальных труб диаметром 50 и 100 мм, бывших в эксплуатации (без сварных стыков);
- 4, 5, 6 – по формуле проф. А.Д. Альшуля для стальных труб при различных значениях эквивалентной песочной шероховатости (без сварных стыков);
- 7 – по формуле для стальной трубы со сварными стыками ($K = 3$ мм)

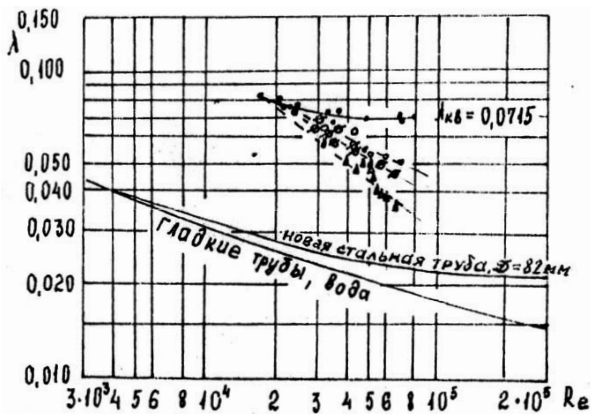


Рис. 9. Экспериментальные зависимости коэффициента Дарси в стальной трубе с расчетным диаметром 82 мм, бывшей в эксплуатации в лабораторных условиях 18 лет:

- – водопроводная вода;
- ° – водопроводная вода с добавками полиакриламида американского производства «Пушер» с концентрацией $C = 0,0026\%$ и молекулярным весом 7,12 млн;
- ∅ – водопроводная вода с добавками полиакриламида японского производства марки DKS-ORP-49 фирмы «Дай-Ити» с концентрацией $C = 0,0024\%$ и молекулярным весом 11 млн;
- Δ – то же с концентрацией $C = 0,005\%$

На рис. 8, 9 представлены полученные нами на гидравлической установке опытные данные при исследовании турбулентного потока воды в трубе с $D=82$ мм, длительное время находящейся в эксплуатации. Здесь также представлены кривые для коэффициентов сопротивления трения, вычисленные на ЭВМ по формуле А.Д. Альтшуля, Колбрука-Уайта (расхождение по λ не более 3%) и по формуле Ф.А. Шевелева.

В расчетах использовались справочные величины различий эквивалентной шероховатости ($K_{\text{э}}=1,0; 2,0; 3,0$ мм), характеризующих шероховатость «старых заржавленных» и «сильно заржавевших и с большими отложениями» стальных сварных труб.

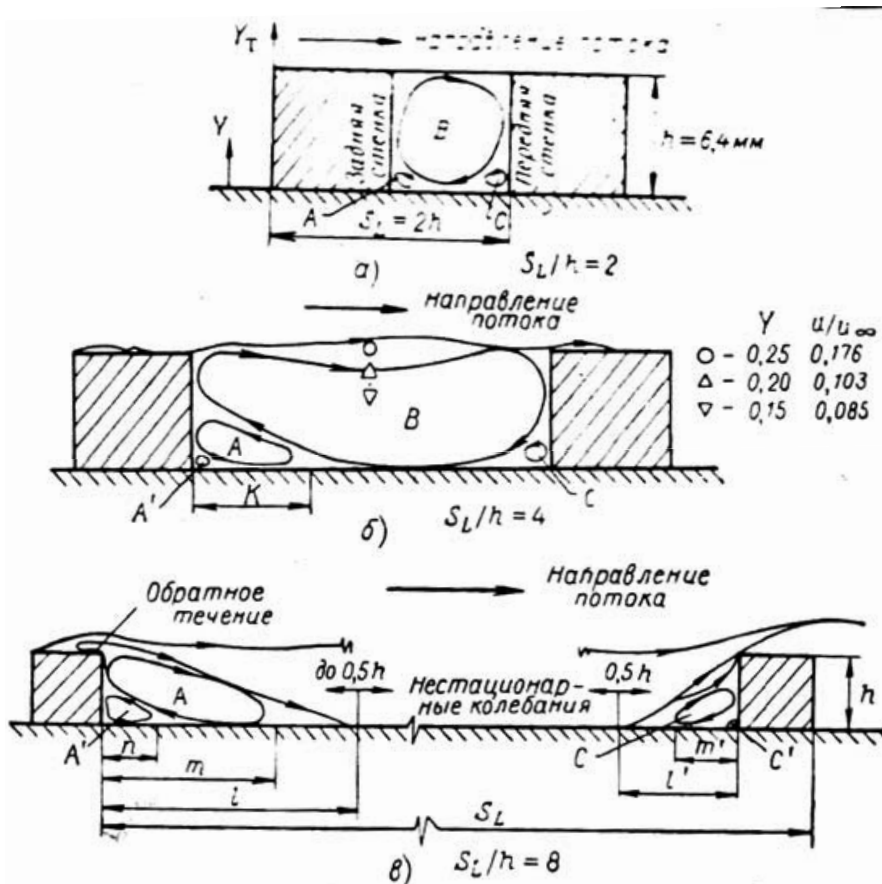


Рис. 10. Структура вихревых зон между турбулизаторами в безградиентном пограничном слое [3]

Заметим, что для стальных сварных труб, сильно заржавевших или с большими отложениями, эквивалентная равномерно-зернистая абсолютная шероховатость k_s , мм, оценивается величиной до 4 мм, а для чугунных труб — 3 мм и более (изношенность труб и оборудования в сетях по данным отраслей достигает более 70%). Например, по формуле Б.Л. Шифринсона $\lambda = 0,11(k_s/d)^{0,25}$ для вполне шероховатой трубы $d=100$ мм имеет $\lambda=0,0437$. Как видно, это сильно заниженные значения λ по сравнению с волнистым движением в трубах с волнисто-шероховатой поверхностью в экспериментах.

Кривая $\lambda=f(Re)$ для испытуемой стальной трубы с $D=82$ мм располагается значительно выше указанных труб. Коэффициент гидравлического сопротивления при турбулентном режиме изменялся в диапазоне $\lambda=0,0715 \sim 0,082$ при $Re=1,5 \cdot 10^4 \div 8 \cdot 10^4$ и возрос по сравнению с новой стальной трубой примерно в 2,93÷3,25 раза, а по сравнению с коэффициентом λ для «сильно заржавленных» и «сильно заржавевших и с большими отложениями» (их форма и расположение в справочнике не раскрывается) труб с $D=82$ мм и $K_s=3$ мм возрос примерно в 1,5÷1,7 раза. Такой рост λ обусловлен влиянием волнисто-шероховатой поверхности труб, т.е. волновым сопротивлением, которое недостаточно учитывалось указанными выше исследователями.

Из рис. 9 следует, что полиакриламид (ПАА) японского производства, имеющий большой молекулярный вес, обладает несколько большей эффективностью при примерно одинаковой концентрации. При одном и том же числе Re опытные точки для слабых водных растворов ПАА фирмы «Дай-Ити» располагаются ниже, чем для растворов ПАА американского производства.

Материалы ПАА для исследований были предоставлены институтом «Гипростокнефть» (г. Самара). Их растворы институт широко использовал для заводнения пластов с целью интенсификации нефтеотдачи на месторождениях Западной Сибири.

Эффект снижения гидравлического трения увеличивается с ростом концентрации полимерной добавки и числа Рейнольдса. Так, снижение гидравлического трения слабого раствора ПАА японского производства с концентрацией $C=0,005$ % и молекулярным весом 11 млн по сравнению с водой при

$Re=57800$ составило примерно 43 %, а при $Re=63400$ – 49,7 %.

Эффект снижения трения в стальной трубе, бывшей в эксплуатации и со сварными стыками, увеличивается с ростом концентрации полимерной добавки (до оптимальной) и числа Re .

Использование в воде высокомолекулярных полимерных добавок ПАА, обладающих длинноцепочечной структурой, позволяло подавлять турбулентные пульсации, ламинизировать и утолщать ПС.

Проведение экспериментальных исследований труб с турбулизаторами позволит найти полуэмпирические зависимости и оценить увеличение волнового сопротивления в натуральных трубных сетях и дать практические рекомендации для народного хозяйства.

Моделирование волнисто-шероховатых поверхностей (геометрическое, кинематическое и гидродинамическое) приобретает важное значение, так как оно оказывает большое влияние на гидравлическое сопротивление, а учет турбулизаторов с различной геометрией в пристеночной области позволяет провести детальное исследование режимов течения потока жидкости и выработать критерий их оценки. Визуализация обтекания плавно очерченных выступов на поверхности показывает, что при повороте потока, набегающего на выступ, возникает система трехмерных винтообразных вихрей. Их оси расположены эквивалентно стенке, а соседние вихри вращаются в разные стороны.

Турбулизаторами потока являются кольца из проволоки, надетые на гладкую трубу, проволочные спирали, намотанные на трубу в виде прямоугольной или треугольной нарезки, а также отдельные кольца и спирали. Как правило, они занимают поперечное к потоку расположение и образуют фронт волн, перпендикулярный движению жидкости в трубах в зависимости от геометрии и расположения этих элементов.

Влияние числа Re на теплообмен и гидравлическое сопротивление в трубах с искусственными турбулизаторами в пограничном слое существенно зависит от высоты, шага и формы турбулизаторов и рода теплоносителя (газ, капельная жидкость), а также режима течения и других факторов.

На рис. 10 показана структура и геометрия вихревых зон между турбулизаторами потока (табл. 1). Между отрывными зонами образование

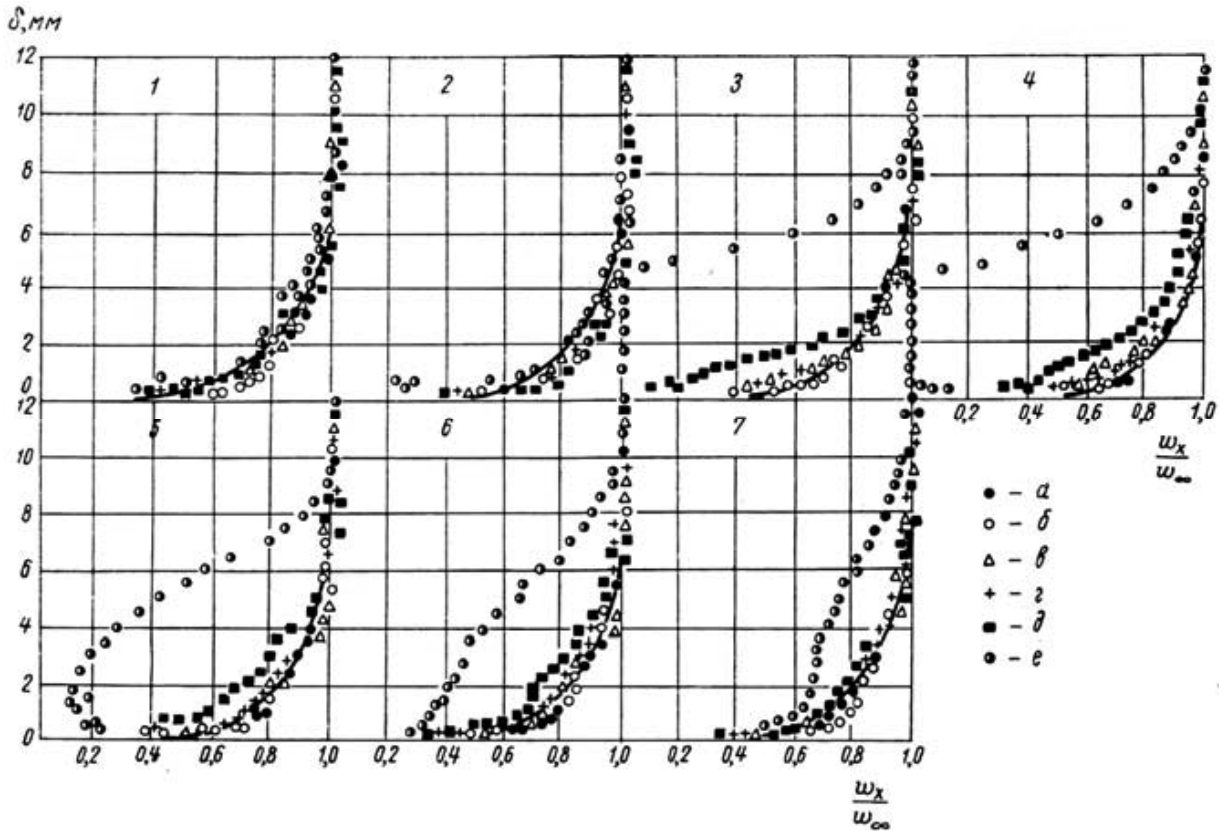


Рис. 11. Эпюры скоростей в пограничном слое на пластине с единичным элементом шероховатости прямоугольной формы различной высоты (координата сечения x отсчитывается от передней кромки пластины) [2]:
 1 - $x = 181$ мм; 2 - $x = 202$ мм; 3 - $x = 207$ мм; 4 - $x = 212$ мм; 5 - $x = 222$ мм; 6 - $x = 242$ мм; 7 - $x = 282$ мм
 Для всех графиков: а - $h_r = 0$; б - $h_r = 0,35$ мм; в - $h_r = 0,66$; г - $h_r = 0,97$ мм; д - $h_r = 1,85$ мм; е - $h_r = 3,9$ мм

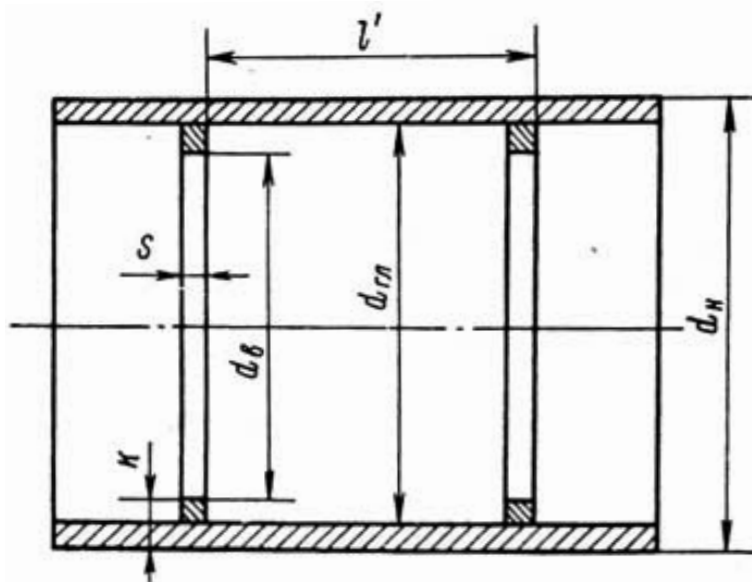


Рис. 12. Труба с размещенными в ней диафрагмами

турбулентности происходит примерно так же, как и на гладкой стенке. Около стенки в зоне больших градиентов скорости в результате потери устойчивости потока возникают вихревые структуры. Затем они выбрасываются за вязкий и буферный слой ПС.

В [2] приведены результаты опытов на пластине с единичным элементом шероховатости прямоугольной формы. Цель работы состояла в определении влияния высоты точки отрыва ПС на изменение самого ПС, а также на теплоотдачу и аэродинамические сопротивления шероховатой пластины. На рис. 11 приведены эпюры скоростей ПС на пластине с элементом, который отстоит от передней кромки пластины на расстоянии x . Сечение $x=181$ мм расположено перед элементом шероховатости на расстоянии 21 мм. В этом сечении эпюра скоростей ПС для всех значений высот прямоугольного элемента шероховатости удовлетворительно совпадает с линией, соответствующей распределению скоростей по закону в степени $1/7$. Это касается и распределения скоростей в сечении элемента шероховатости $x=202$ мм. При этом толщина ПС шероховатости была несколько меньше, чем в сечении $x=181$ мм.

В сечении $x=207$ мм, отстающем на расстояние 5 мм по потоку от прямоугольного выступа, приведена эпюра распределения скоростей в ПС непосредственно за элементом шероховатости, т.е. в зоне отрыва. Видно, что после элемента шероховатости высотой $h_1=0,35$ мм; 0,66 мм; 0,97 мм уже на расстоянии 5 мм эпюра скоростей соответствует турбулентному режиму течения. Этот закон сохраняется во всех последующих сечениях ($x=212$; 222; 242; 282 мм). Таким образом, турбулентный ПС, срываясь с выступа, вновь присоединяется к пластине на расстоянии не более 5 мм для указанных значений высоты прямоугольного выступа.

В результате отрыва, воздух в слое зоны отрыва тщательно перемешивается. В этом можно убедиться на примере эпюры скоростей в сечении $x=207$ мм после элемента шероховатости высотой $h_1 = 3,9$ мм. В этом сечении воздух в слое толщиной до 4,5 мм над пластиной практически неподвижен, т.е. градиент скорости по высоте этого слоя равен нулю. Затем на последующих двух миллиметрах слоя (от 4,5 до 6,5 мм) скорость изменяется от 0 до 0,9 от скорости набегающего потока. Это указывает на существ-

Р. Кохом [4] исследовались теплоотдача и гидравлическое сопротивление при турбулизации потока различными вставками и насадками. Эксперименты проводились в трубе с внутренним диаметром 50 мм и длиной 980 мм. Длина стабилизирующего участка составляла 2,5 м. Наибольший интерес представляют поперечные вставки-диафрагмы, располагаемые внутри круглой трубы.

В табл. 2 приведены характеристики диафрагм, которые плотно размещались в трубе.

При обработке опытов скорость воздуха определялась в полном сечении трубы без учета изменения проходного сечения за счет диафрагм.

Выявлено, что при наличии диафрагм переход от ламинарного режима течения к турбулентному происходит при значительно меньших критических значениях параметра Re [4]:

$$Re_{кр} = 2900m^{2,2}, \quad (12)$$

где $m = \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 < 1,0$.

Исследование аэродинамического (лобового) сопротивления шероховатой трубы показало, что на коэффициент сопротивления наибольшее влияние оказывает величина m , а отношение l'/h влияет не так сильно. В области $1500 \leq Re \leq 80000$; $0,25 \leq m \leq 0,85$ и $10 \leq l'/h \leq 200$ коэффициент сопротивления достаточно точно описывается уравнением [4]:

$$\xi = 17500 \left[\left(\frac{l'}{h} \right) + 2,5 \right]^{1,77} e^{-m[6-0,01(\frac{l'}{h})]}. \quad (13)$$

В него входит экспоненциальная функция, зависящая от величины m и относительного шага l'/h диафрагмы. По теплоотдаче установлено, что в турбулентной области величина Nu (безразмерный коэффициент теплоотдачи) для трубы с диафрагмами в отдельных случаях в 4,5 раза выше, чем для гладких труб.

Полезные данные о влиянии турбулизирующих вставок в форме различных диафрагм на теплообмен и аэродинамическое сопротивление получил В. Нуннер [6]. В отличие от Р. Коха [4] он исследовал различные формы диафрагм (прямоугольную, полукруглую и сегментарную) и экспериментальным путем оценивал гидравлическое сопротивление труб.

Опыты В. Нуннера [6] проводились в трубе диаметром $d=50$ мм и при длине рабочего участка

Таблица 1

Геометрические характеристики турбулизатора [1]

| S_L/h | n/h | m/h | l/h | l'/h | m'/h | Ширина верхней грани турбулизатора, занятая обратным течением, % |
|-----------------|-------|-------|-------|---------|--------|--|
| 8 | 1 | 4 | 5±0,5 | 1,5±0,5 | 1 | 50 |
| 12 | 1 | 4 | 5±0,5 | 1,5±0,5 | 1 | 50 |
| 24 | 1 | 5 | 6±0,5 | 2±0,5 | 1 | 80 |
| 48 | 1,5 | 6 | 8±0,5 | 3±0,5 | 1,5 | 80 |
| 96 | 1,5 | 6 | 8±0,5 | 3±0,5 | 1,5 | 80 |
| Единичный уступ | | | | | | (Данные [1]) |

Таблица 2

Характеристики диафрагм, исследованных в работе Коха [4]

| Высота диафрагмы h , мм | $m = (d_w/d)^2$ | Относительное расстояние между диафрагмами l'/h | | | |
|---------------------------|-----------------|---|------|------|-------|
| 2 | 0,845 | 9,8 | 19,6 | 78,4 | 156,0 |
| 5 | 0,640 | 3,92 | 9,8 | 65,0 | 196,0 |
| 10 | 0,360 | 3,92 | 9,8 | 32,7 | 98,0 |
| 12,5 | 0,250 | 26,0 | 78,4 | - | - |

Таблица 3

Основные характеристики экспериментальных труб со вставками-диафрагмами, исследованных в работе Нуннера [6]

| Профиль колодца | Обозначение опытных точек | Количество колец в трубе z | Расстояние между кольцами l' , мм | Высота кольца h_r , мм | Ширина кольца s , мм | Внутр. диаметр кольца d_{gr} , мм | Средн. диаметр трубы d_{cp} , мм | Относит. диаметр колец d_r/d_{za} | Относит. шаг колец l'/d_{za} | Отношение поверхностной $F_{поверх}$ к $F_{за}$ | Критическое число $Re_{кр}$ |
|---------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---|-----------------------------|
| Гладкая труба | 0 | - | - | - | - | - | 50,06 | 1 | - | 1 | 2600 |
| Прямоугольник | + | 24 | 40,9 | 2 | 2,5 | 46 | 49,82 | 0,92 | 0,82 | 1,09 | 2000 |
| Полукруг $R = 2$ мм | △ | 6 | 163,5 | 2 | 4 | 46 | 49,95 | 0,92 | 3,27 | 1,01 | 2600 |
| То же | ▲ | 24 | 40,9 | 2 | 4 | 46 | 49,82 | 0,92 | 0,82 | 1,047 | 2000 |
| Сегмент $R = 18$ мм | □ | 6 | 163,5 | 2 | 15 | 46 | 49,80 | 0,92 | 3,27 | 1,006 | 2600 |
| Полукруг $R = 4$ мм | ■ | 12 | 81,7 | 4 | 8 | 42 | 49,50 | 0,84 | 1,63 | 1,04 | 1200 |
| То же | | 24 | 40,9 | 4 | 8 | 42 | 48,92 | 0,84 | 0,82 | 1,08 | 1900 |
| » » | ● | 48 | 20,4 | 4 | 8 | 42 | 47,78 | 0,84 | 0,41 | 1,16 | 2300 |
| » » | | 122 | 8 | 4 | 8 | 42 | 43,85 | 0,84 | 0,16 | 1,4 | 2900 |

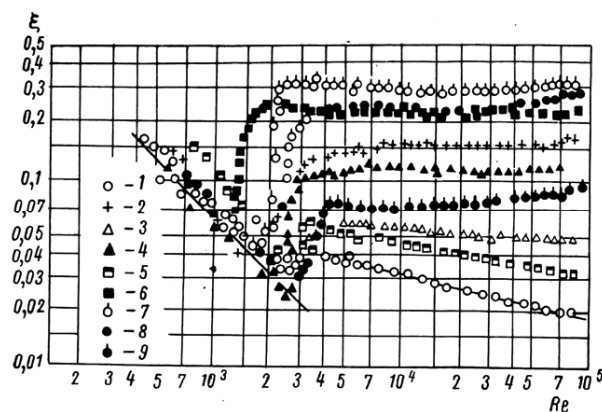


Рис. 13. Изменение коэффициента сопротивления труб с размещенными в ней диафрагмами:
 1 – гладкая труба; 2 – $d_R/d_{г.л} = 0,92$, $l'/d_{г.л} = 0,82$; 3 – $d_R/d_{г.л} = 0,92$, $l'/d_{г.л} = 3,27$; 4 – $d_R/d_{г.л} = 0,92$, $l'/d_{г.л} = 0,82$;
 5 – $d_R/d_{г.л} = 0,92$, $l'/d_{г.л} = 3,27$; 6 – $d_R/d_{г.л} = 0,84$, $l'/d_{г.л} = 1,63$; 7 – $d_R/d_{г.л} = 0,84$, $l'/d_{г.л} = 0,82$; 8 – $d_R/d_{г.л} = 0,84$, $l'/d_{г.л} = 0,41$;
 9 – $d_R/d_{г.л} = 0,84$, $l'/d_{г.л} = 0,16$

рующий участок длиной 50d. Турбулизация потока создавалась с помощью разжимных колец, которые вставлялись в гладкую трубу с различным шагом.

В табл. 3 приведены основные характеристики экспериментальных труб со вставками-диафрагмами, а результаты измерений аэродинамического сопротивления показаны на рис. 13.

Из табл. 3 следует, что увеличение расстояния между диафрагмами высотой h=4 мм сопровождается уменьшением $Re_{кр}$, а для диафрагм h=2 мм – наоборот. Наибольшее увеличение теплоотдачи в турбулентной области получено при $\frac{d_K}{d_{ГЛ}} = 0,84$ и относительном шаге $\ell'/d_{ГЛ} = 0,82$. Но при шагах $\ell'/d_{ГЛ} = 0,41$ и $0,16$ эффект был значительно меньше. То же относится и к коэффициенту гидравлического сопротивления.

Интенсификация теплообмена достигается за счет образования в результате накатки труб с толщиной стенки 0, 5 мм и выше удобообтекаемых диафрагм с малым профильным сопротивлением (рис. 14) [3]. Сформировалась технология выполнения накатки: толщина ролика, накатка по калибру или обжим трубы тремя роликами, толщина стенки, род материала и т.д.

Интенсификация теплообмена в кольцевых трубах за счет искусственной турбулизации потока не требует существенного увеличения наружного диаметра труб и применима в любых кольцевых каналах, в том числе и с малыми d_2/d_1 . Изготовление турбулизаторов на наружной поверхности труб не связано со значительными технологическими трудностями. Помимо накатанных труб наиболее распространены на практике турбулизаторы в виде колец из проволоки, проволочных спиралей или в виде прямоугольной или треугольной нарезки (рис. 14).

В [3] помимо характеристик каналов и турбулизаторов приведены значения отношений чисел Нуссельта и коэффициентов гидравлического сопротивления, полученные при одинаковых расходах теплоносителя через кольцевой канал или числах Re . Коэффициент теплоотдачи для труб для оребренных поверхностей отнесен к поверхности неоребренной трубы, а диаметр гладкой трубы равен диаметру трубы, несущей оребрение (d_1). Скорость потока определялась по течению канала площадью $\frac{\pi(d_2^2 - d_1^2)}{4}$. Эквивалентный размер $d_3 = d_2 - d_1$.

Проанализируем влияние числа Re на коэффициент гидравлического сопротивления в трубах. Если $\Delta p = p_1 - p_2$ измеренный перепад давления на экспериментальной трубе, то приближенно можно записать, без учета изменения плотности жидкости по длине, уравнение

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \xi_{TP} \frac{L_{TP}}{D} \frac{\rho v^2}{2} + \sum_1^n \xi_M \frac{\rho v^2}{2}, \quad (14)$$

где ξ_{TP} – коэффициент гидравлического сопротивления, обусловленный средним сопротивлением трения на гладких участках трубы; L_{TP} – общая длина гладких участков трубы; \bar{v} – средняя скорость в поперечном сечении гладких участков.

Последнее уравнение перепишем в виде:

$$\xi \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} = \xi_{TP} \frac{L_{TP}}{D} \frac{\rho v^2}{2} + \frac{L}{t} \xi_M \frac{\rho v^2}{2}, \quad (15)$$

или

$$\xi = \frac{L_{TP}}{L} \xi_{TP} + \frac{\xi_M}{t/D}, \quad (16)$$

где t – шаг диафрагм, а t/D – их относительных шаг; ξ – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления с искусственными турбулизаторами.

Известно, что при развитом турбулентном сечении коэффициент местного сопротивления одиночной диафрагмы с острыми кромками ξ_M не зависит (или зависит, но очень слабо) от числа Re . Коэффициент гидравлического сопротивления в общем случае для шероховатых труб зависит от числа Re , высоты, шага и формы турбулизаторов. Согласно работе [4], в которой с помощью тензометра измерялось распределение напряжения трения между выступами кольцевых диафрагм, среднее напряжение трения на этих участках подчиняется закону

$$\tau_{TP} = A Re^{1,75} \text{ или } \xi_{TP} = \frac{B}{Re^{0,25}}. \quad (17)$$

Влияние числа Re такое же, как и в гладкой трубе, но константы A и B существенно зависят от высоты турбулизатора. Эти коэффициенты увеличиваются с ростом высоты.

Если гидравлическое сопротивление почти целиком определяется местными потерями, то суммарный коэффициент сопротивления практически не зависит от числа Re . Это так называемая автомодельная область сопротивления. Если же доля трения в общем сопротивлении существенна (при больших d/D и t/D и плавных профилях турбулизаторов), то и суммарный коэффициент гид-

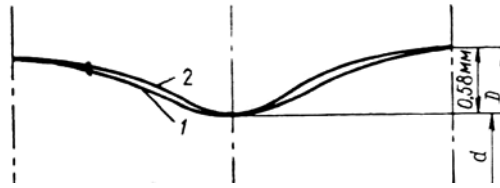


Рис. 14. Влияние технологии накатки на форму профиля диафрагм:
1 - накатка по калибру; 2 - накатка без калибра тремя роликами

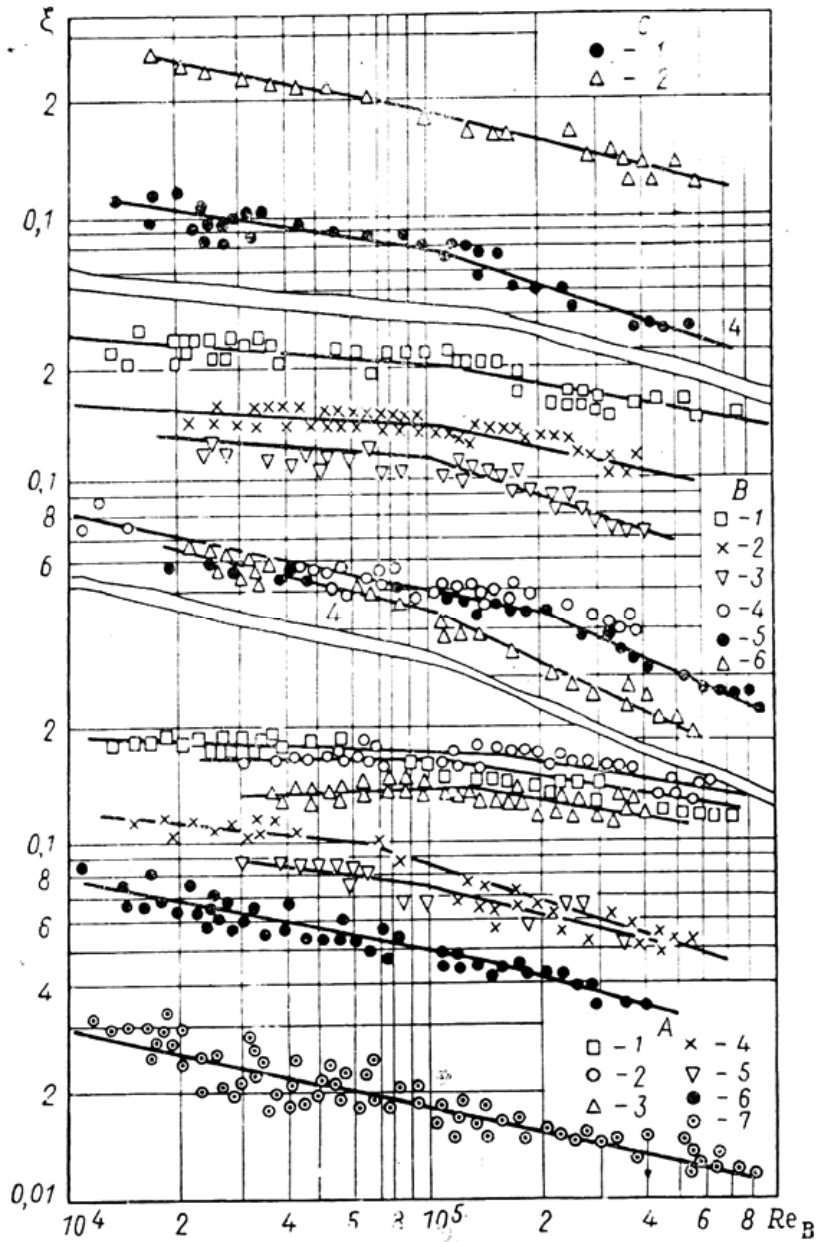


Рис. 15. Средний коэффициент сопротивления в накатанных трубах в зависимости от числа Re и геометрии:
 А - $t/D = 0,25$; 1 - $d/D = 0,887$; 2 - $d/D = 0,894$; 3 - $d/D = 0,905$; 4 - $d/D = 0,935$; 5 - $d/D = 0,943$; 6 - $d/D = 0,964$;
 7 - гладкая труба; В - $t/D = 0,5$; 1 - $d/D = 0,880$; 2 - $d/D = 0,905$; 3 - $d/D = 0,925$; 4 - $d/D = 0,945$; 5 - $d/D = 0,957$;
 6 - $d/D = 0,967$; С - $t/D = 1,0$; 1 - $d/D = 0,915$; 2 - $d/D = 0,968$

равлического сопротивления зависит от числа Re , заметно уменьшаясь с его ростом.

Исключение составляют те случаи, когда структура потока за диафрагмой качественно меняется при достижении определенного числа Re . Это характерно только для плавных профилей выступов, сопротивление которых, с увеличением числа Re , может довольно резко уменьшаться по закону, отличному от Блазиуса, где $m > 0,25$. Однако ξ не достигает значений $\xi_{гл}$ и при дальнейшем росте Re снова увеличивается [3].

На рис. 15 представлен средний коэффициент сопротивления в накатанных трубах в зависимости от числа Re и геометрии. Видно, что коэффициент ξ в накатанных трубах в широком диапазоне $Re=10^4-10^5$ падает, а автомодельная область сопротивления труб отсутствует.

Проанализируем результаты экспериментальных работ в кольцевых каналах с поперечными наплавками на внутренней трубе (табл. 4) и в кольцевых каналах с турбулизаторами (табл. 5) (ссылки на авторов, год опубликования даны по списку литературы [3]).

Отношение числа $Nu/Nu_{гл}$ и $\xi/\xi_{гл}$ в табл. 4,5 приведены в зависимости от относительного шага размещения турбулизаторов t/h при постоянных значениях относительной высоты турбулизаторов h/d_3 в качестве параметра. При постоянном h/d_3 зависимость $Nu/Nu_{гл}$ от t/h имеет максимум, несколько смещающийся в сторону меньших t/h при увеличении h/d_3 . При $h/d_3 \approx 0,1-0,016$ максимум $Nu/Nu_{гл}$ наблюдается при $t/h=10$, а при $h/d_3 \approx 0,03$ – при $t/h \approx 5$.

Отношение коэффициентов гидравлических сопротивлений $\xi/\xi_{гл}$ при постоянных h/d_3 также имеет максимум, и он тем больше, чем больше отношение h/d_3 и соответствующее значение $t/h \approx 10$.

Каналы с прямоугольным и треугольным оребрением имеют более высокое гидравлическое сопротивление, чем каналы с проволочным оребрением. Применение поперечного оребрения позволяет интенсифицировать теплоотдачу в кольцевых каналах при умеренном росте гидравлического сопротивления. Выбор оптимальной геометрии оребрения зависит от конкретных условий. Геометрические размеры оребрения выбираются так, чтобы отношение шага турбулизаторов к их высоте было близко к 10 (по-видимому, оно определяет длину волны), а отношение высоты турбулизатора к экви-

валентному диаметру было в пределах 0,01-0,08 для проволочного оребрения и 0,01-0,03 для точеных прямоугольных и треугольных ребер [3].

Из табл. 4, 5 видно, что интенсификация теплоотдачи увеличивается с ростом числа Re . Максимальная величина ее составляет 2,0-2,5 раза при увеличении гидравлического сопротивления в 2,7-5 раз, т. е. рост гидравлических сопротивлений «перегоняет» рост теплоотдачи. Таким образом, турбулизаторы всех типов обеспечивают значительное увеличение волнового сопротивления в пристеночных слоях труб. Этот эффект безусловно должен учитываться при эксплуатации труб, когда на внутренней поверхности труб из-за зарастания (или инкрустации) появляются поперечные (перпендикулярные) «рубцы», генерирующие волновые движения потока и турбулентность.

Наиболее приемлемым и рациональным методом выполнения труб с искусственными турбулизаторами является наружная обкатка труб роликом. При этом интенсифицируется теплообмен в межтрубном пространстве и увеличивается их гидравлическое сопротивление, но их рост неодинаков. Опытные данные по средней теплоотдаче при нагревании и охлаждении газов ($T_w/T_0=0,13-1,6$) обобщаются формулами с точностью $\pm 12\%$ [3].

Для $d/D=0,9-0,97$ и $t/D=0,5-10$ используется следующая полуэмпирическая формула:

$$\frac{Nu}{Nu_{гл}} = \left(1 + \frac{\lg Re_w - 4,6}{7,45}\right) \left(\frac{1,14 - 0,28\sqrt{1-d/D}}{1,14}\right) \exp\left[\frac{9(1-d/D)}{(t/D)^{0,58}}\right], \quad (18)$$

где число Re_w берется по средней температуре стенки: для нагревания газов:

$$Nu_{гл} = 0,0207 Re^{0,8} Pr^{0,43}, \quad (19)$$

где определяющая температура – средняя по длине температура стенки;

для охлаждения газов:

$$Nu_{гл} = 0,0192 Re^{0,8} Pr^{0,43}, \quad (20)$$

где определяющая температура – средняя по длине температура стенки, или

$$Nu_{гл} = 0,018 Re^{0,8}; \quad (21)$$

а при определяющей температуре – среднекалориметрическая температура по длине трубы. Во всех приведенных случаях при турбулентном течении потока жидкости

$$Nu_{гл} \approx Re^{0,8}.$$

Таблица 4

Результаты экспериментальных работ по интенсификации теплообмена в кольцевых каналах с поперечными канавками на внутренней трубе [3]

| Автор, год опубликования работ | d_2/d_1 | Форма канавок в разрезе | h/d_3 | t/d_3 | t/h | Nu/Nu_{ca} при Re | | | | | ξ/ξ_{ca} при Re | | | |
|---|-----------|-------------------------|---------|---------|-------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|--------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | | 10^4 | $2 \cdot 10^4$ | $4 \cdot 10^4$ | $6 \cdot 10^4$ | 10^5 | 10^4 | $2 \cdot 10^4$ | $4 \cdot 10^4$ | $6 \cdot 10^4$ |
| Данные авторов (1970) | 1,455 | Полукруг | 0,033 | 0,5 | 15,2 | 1,38 | 1,38 | 1,38 | 1,38 | 1,38 | – | – | – | – |
| | | | 0,052 | 0,5 | 9,63 | 1,38 | 1,38 | 1,38 | 1,38 | 1,39 | – | – | – | – |
| | | | 0,044 | 1,0 | 22,7 | 1,30 | 1,30 | 1,32 | 1,34 | 1,37 | – | – | – | – |
| | | | 0,079 | 1,0 | 12,7 | 1,41 | 1,41 | 1,41 | 1,43 | 1,45 | – | – | – | – |
| | | | 0,110 | 1,0 | 9,1 | 1,35 | 1,35 | 1,38 | 1,41 | 1,45 | – | – | – | – |
| | | | 0,132 | 1,0 | 7,58 | 1,35 | 1,41 | 1,45 | 1,46 | 1,48 | – | – | – | – |
| | | | 0,086 | 2,0 | 23,3 | 1,21 | 1,21 | 1,21 | 1,40 | 1,23 | – | – | – | – |
| 0,151 | 2,0 | 13,2 | 1,20 | 1,21 | 1,24 | 1,27 | 1,30 | – | – | – | – | | | |
| Кемени, Сайферс (1961) | 1,38 | Полукруг | 0,0275 | 0,275 | 10 | 1,105 | 1,21 | 1,30 | 1,34 | | 1,03 | 1,06 | 1,13 | 1,18 |
| Брауэр (1961) | 1,287 | Треугольник с углом 60° | 0,0697 | 0,0815 | 1,17 | 2,17 | 1,97 | 1,80 | 1,80 | | 1,74 | 2,06 | 2,54 | – |
| | | | 0,0697 | 0,151 | 2,17 | 2,02 | 1,80 | 1,67 | 1,67 | | 1,67 | 1,97 | 2,45 | – |
| | | | 0,0697 | 0,221 | 3,17 | 1,67 | 1,60 | 1,55 | 1,55 | | 1,40 | 1,67 | 2,06 | – |
| Богданов Ф.Ф., Коршаков А.Н., Уткин О.И. (1967) | 1,133 | Треугольник с углом 60° | 0,004 | 0,101 | 25 | 1,32 | 1,32 | 1,32 | 1,32 | | 1,30 | 1,75 | 2,20 | 2,52 |
| | | | 0,0101 | 0,101 | 10 | 1,71 | 1,82 | 1,89 | 1,97 | | 1,48 | 1,93 | 2,39 | 2,77 |
| | | | 0,0202 | 0,101 | 5 | 2,0 | 2,35 | 2,54 | 2,60 | | 1,67 | 2,17 | 2,48 | 3,11 |

Таблица 5

Результаты экспериментальных работ по интенсификации теплообмена в кольцевых каналах с турбулизаторами [3]

| Автор, год опубликования работ | Форма канавок в разрезе | d_2/d_1 | Рабочее тело | h/d_3 | t/d_3 | t/h | Nu/Nu_{ca} при Re | | | | | ξ/ξ_{ca} при Re | | | | |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------|--------------|---------|---------|-------|-----------------------|----------------|----------------|--------|----------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | | | 10^4 | $2 \cdot 10^4$ | $6 \cdot 10^4$ | 10^5 | $2 \cdot 10^5$ | 10^4 | $2 \cdot 10^4$ | $4 \cdot 10^4$ | $6 \cdot 10^4$ | $2 \cdot 10^5$ |
| Федынский О.С., 1959 | Треугольные ребра | 1,26 | вода | 0,0294 | 0,294 | 10 | 1,63 | 1,63 | | | | 2,09 | 2,29 | | | |
| | | | | 0,0294 | 0,588 | 20 | 2,04 | 2,04 | | | | 1,59 | 1,78 | | | |
| | | | | 0,0294 | 0,882 | 30 | 1,86 | 1,86 | | | | 1,41 | 1,59 | | | |
| | Прямоугольные ребра | | | 0,0429 | 0,285 | 6,7 | 2,12 | 2,12 | | | | 2,82 | 3,28 | | | |
| | | | | 0,0429 | 0,571 | 13,4 | 2,66 | 2,66 | | | | 2,82 | 3,28 | | | |
| | | | | 0,0429 | 0,857 | 20 | 2,32 | 2,32 | | | | 2,63 | 3,06 | | | |
| Брауэр, 1961 | Прямоугольные ребра | 1,287 | вода | 0,0697 | 0,1395 | 2 | 2,43 | 2,11 | 1,87 | | | 2,05 | 2,16 | | | |
| | | | | 0,0697 | 0,209 | 3 | 2,8 | 2,24 | 1,96 | | | 2,69 | 2,82 | | | |
| | | | | 0,0696 | 0,348 | 5 | 2,93 | 2,37 | 2,08 | | | 4,35 | 4,51 | | | |
| | | | | 0,0697 | 0,675 | 9,67 | 2,77 | 2,28 | | | | 6,1 | 6,43 | | | |
| | | | | 0,0697 | 1,28 | 18,33 | 2,6 | 2,19 | | | | 4,2 | 4,51 | | | |
| | | | | 0,0697 | 2,42 | 34,7 | 2,23 | 1,85 | | | | 2,97 | 3,16 | | | |
| | | | | 0,0697 | 4,76 | 68 | 1,87 | 1,55 | | | | 1,94 | 2,03 | | | |
| | | 1,728 | 0,0375 | 0,075 | 2 | 2,16 | 2,12 | 1,88 | | | 1,43 | 1,59 | 1,87 | 2,08 | | |
| | | | 0,0375 | 0,1122 | 3 | 2,52 | 2,23 | 2,01 | | | 1,85 | 2,02 | 2,46 | 2,68 | | |
| | | | 0,0375 | 0,1625 | 4,33 | 2,72 | 2,34 | 2,14 | | | 2,72 | 3,04 | 3,60 | 3,98 | | |
| | | | 0,0375 | 0,35 | 9,33 | 2,81 | 2,39 | 2,19 | | | 3,24 | 3,51 | 4,25 | 4,63 | | |
| | | | 0,0375 | 0,662 | 17,67 | 2,54 | 2,19 | 1,94 | | | 2,51 | 2,79 | 3,37 | 3,64 | | |
| | | | 0,0375 | 1,285 | 34,3 | 2,13 | 1,84 | 1,57 | | | 2,10 | 2,33 | 2,79 | 3,09 | | |
| 0,0375 | 2,54 | 67,7 | 1,68 | 1,42 | 1,27 | | | 1,56 | 1,73 | 2,10 | 2,24 | | | | | |
| Сайферс, Кемени, 1961 | Поперечные ребра | 1,38 | вода | 0,0245 | 0,245 | 10 | 2,52 | 2,38 | 1,90 | | | 2,07 | 2,41 | 2,80 | | |
| | | | | 0,0282 | 0,282 | 10 | 2,30 | 2,02 | 1,57 | | | 2,20 | 2,64 | 3,07 | | |
| Драукотт, Лауфер, 1961 | Намотка проволоки на трубки | 2,06 | воздух | 0,0174 | 0,363 | 20,8 | | 1,51 | 2,47 | 2,69 | 2,58 | | 1,28 | 1,71 | 1,86 | 2,02 |
| | | | | 0,031 | 0,363 | 11,7 | | 1,78 | 2,96 | 3,16 | 2,92 | | 1,28 | 2,28 | 2,69 | 2,92 |

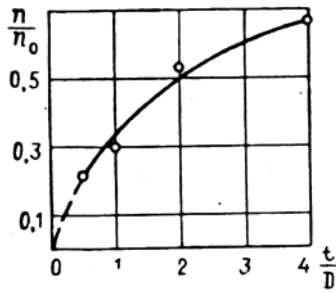


Рис. 16. Зависимость показателя степени при μ_b/μ_w от шага диафрагм [3]

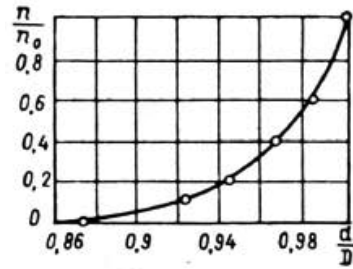


Рис. 18. Зависимость показателя степени при μ_b/μ_w от высоты диафрагм при шаге $t/D = 0,5$ [3]

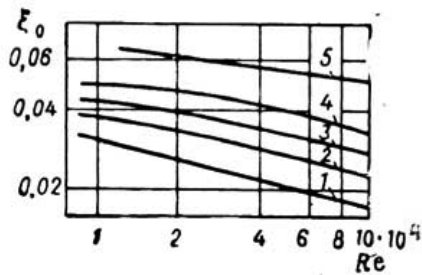


Рис. 17. Изотермический коэффициент гидравлического сопротивления в трубах с различным шагом диафрагм ($d/D = 0,943$) [3]:
1 – гладкая труба; 2 – $t/D = 4,0$; 3 – $2,0$; 4 – $1,0$; 5 – $0,5$

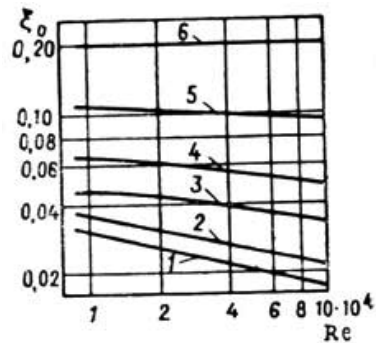


Рис. 19. Изотермический коэффициент гидравлического сопротивления в трубах с различной высотой диафрагм: 1 – гладкая; 2 – $d/D = 0,983$; 3 – $d/D = 0,966$; 4 – $d/D = 0,943$; 5 – $d/D = 0,922$; 6 – $d/D = 0,875$ [3]

В общем случае коэффициент гидравлического сопротивления при неизоотермическом турбулентном движении жидкости в трубах с искусственными турбулизаторами рассчитывается по формуле [3]:

$$\xi = \xi_0 (\mu_w / \mu_g)^n \quad \text{или} \quad \frac{\xi}{\xi_{ГЛ}} = \frac{\xi}{\xi_0} \left(\frac{\mu_w}{\mu_g} \right)^{n_0 \left(\frac{n}{n_0} - 1 \right)},$$

где $\xi_0 = f_1(d/D, t/D, Re)$, $n/n_0 = f_2(d/D, t/D)$ при фиксированной форме профиля турбулизатора.

С уменьшением шага итерации закон сопротивления приближается к автомодельному режиму и влияние неизоотермичности ослабевает. Аналитически эта зависимость записывается в виде [3]:

$$\frac{n}{n_0} = 10^{\frac{0,369}{t/D} (1,217 + t/D)}$$

На рис. 12, 13 и 14, 15 приведены результаты обработки опытных данных на накатанных трубах с диафрагмами различного шага и высоты при постоянном шаге $t/D = 0,5$ [3]. По мере увеличения высоты турбулизаторов влияние неизоотермичности потока на коэффициент гидравлического сопротивления резко падает. Закон сопротивления приближается к автомодельному. Так, труба с диафрагма-

стоянном шаге $t/D = 0,5$ [3]. По мере увеличения высоты турбулизаторов влияние неизоотермичности потока на коэффициент гидравлического сопротивления резко падает. Закон сопротивления приближается к автомодельному. Так, труба с диафрагмами $d/D = 0,875$ и $t/D = 0,5$ в диапазоне $Re = 10^4 - 10^5$ практически полностью шероховатая, а коэффициент гидравлического сопротивления в ней не зависит от неизоотермичности (рис. 16-19).

В [3] показаны типичные зависимости суммарного коэффициента гидравлического сопротивления от числа Re на газах в трубах с диафрагмами. Из них следует, что для всех труб коэффициент ξ падает с ростом Re . Это благоприятно отражается на эффективности интенсификации теплообмена. Характерно заметное изменение закона сопротивления в области $Re = 10^5$. Область сопротивления уже не является автомодельной, а зависит от числа Re .

Проанализируем эпюры скоростей, измеренные в турбулентном пограничном слое на подвижных и жестких волнисто-шероховатых поверхностях методом фотосъемки волнового движения с последующей статистической обработкой фотogramм полей мгновенных

скоростей [5]. Были определены величины осредненных скоростей, их пульсационные и турбулентные напряжения по всей высоте до ближайших к обтекаемой поверхности слоев. Это позволило вычислить касательные усилия τ_0 на стенки и величины динамических скоростей $u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$. Для сопоставления результатов привлекались измерения характеристик с помощью термоанемометров и других методов и средств.

Оказалось, что измерения вблизи шероховатой поверхности сильно зависят от расположения точки измерения относительно отдельных выступов. Поэтому течение вблизи шероховатой поверхности удалось описать лишь суммой локальных характеристик по большому числу отдельных вертикалей. Для анализа общих закономерностей движения в пристеночной области интерес представляют не эти локальные, а осредненные по элементу шероховатостей поверхности характеристики. Для их получения в основу обработки фотограмм был положен принцип осреднения по площади. При статистической обработке осреднялись все значения в точках, расположенные над одной горизонтальной над рассматриваемым элементом шероховатости.

Для обеспечения достаточной надежности осреднения выбирался участок, включающий по длине 5-8 отдельных выступов. Это позволило получить очень четкие характеристики и вблизи волнисто-шероховатых поверхностей [5]. Наиболее простые и универсальные зависимости для осредненных по элементу шероховатой поверхности характеристик в опытах получают, если начало координат расположить в точке, образуемой экстраполяцией на нулевое значение эпюры скоростей. Практически эта точка соответствует отметке впадин.

Опыты с жесткой волнисто-шероховатой поверхностью проводились в аэродинамической трубе. Обтекаемая поверхность была представлена плогими волнами. Она имела рельеф, имитирующий рябь на натуральных волнах. Скорость ветра составляла 2-6 м/с. Полученные в опытах профили скоростей являлись логарифмическими.

Однако в [5] также не дан полный анализ особенностей и механизма волнистости обтекаемой поверхности. Принимается двухслойная модель пристеночного турбулентного движения (особый пристеночный вязкий подслой с линейным распределением скоростей и турбулентным ядром) и описывается взаимодействие бугорков шероховатости с вязким подслоем при режиме гладких труб и с внешней турбулентной областью в условиях проявления шероховатости за

пределами вязкого подслоя, где проявляются не вязкие, а уже лобовые сопротивления.

Неустойчивая термическая стратификация заметно уменьшает наклон кривой профиля скоростей. Поэтому увеличивается и сопротивление. На взволнованной водной поверхности также заметно уменьшение наклона профиля при турбулентных течениях у гладких и зернисто-шероховатых скоростей. Во всех этих случаях волнистость обтекаемой поверхности приводит к увеличению коэффициента сопротивления и к уменьшению наклона профиля скоростей. Выявлена неравномерность движения — наличие участков локального ускорения и замедления, вызванного волнами в пристеночных слоях.

Расхождение измерений по вертикалям и по длине участков (составляющих длину волны) также подтверждают, что для нахождения характеристик и определения влияния волнисто-шероховатой поверхности на сопротивление необходимо привлекать несколько параметров, а не одну эквивалентную шероховатость.

Поскольку при эксплуатации волнисто-шероховатая поверхность труб непрерывно изменяет свою форму и размеры, то для контроля увеличения волновых гидравлических сопротивлений и уменьшения расходов необходимо выстроить натурную систему контроля давлений, перепадов давлений, температур и т. д. в сети. Точка сети водоснабжения, наиболее удаленная от источника водоснабжения или находящаяся на самой высокой отметке по отношению к точке питания сети, называется диктующей точкой.

В диктующей точке устанавливается преобразователь давления и радиомодем. Например, Санкт-Петербургский водоканал в настоящее время использует систему из более чем 130 точек наблюдения на напорных водоводах (первая диктующая точка появилась летом 1995 г.).

Снятие информации со всех диктующих точек проводится синхронно и занимает не более 90 с. Это позволяет получить целостную циклограмму распределения давления и расхода в городе и контролировать основные гидравлические характеристики сети.

В случае необходимости количество диктующих точек может быть увеличено, в том числе и за счет использования мобильных пунктов наблюдения. Созданная по аналогии система позволит контролировать как штатные, так и внештатные ситуации в крупных городах России, в том числе и в г. Самаре. При этом преобразователь давления и радиомодем, позволяющий без ретрансляции передавать данные на расстояние примерно до 40 км, будет

составлять оборудование каждой диктующей точки. Подключение оборудования для замера давления в системах водоснабжения к единому серверу позволяет контролировать давление воды в разных точках и, следовательно, перепад давлений и расход воды на выделенных участках, в том числе с повышенной волнисто-шероховатой поверхностью, осуществлять коммерческий учет воды и последовательно оценивать ресурс системы, выстраивать перспективные планы-графики проведения ремонтно-монтажных работ. С целью снижения затрат, диктующие точки рекомендуется устанавливать в колодцах, в водонапорных узлах, водонапорных станциях и т. д.

Для удобства возможен просмотр параметров в графическом виде как всех диктующих точек, так и нескольких выбранных, а также данных, ранее снятых с диктующих приборов.

Возможен выбор контролируемых параметров с учетом доступного уровня автоматизации, колебаний уровня нагрузки в системе, т. е. циклограмм, состава и свойств воды, а также природоохранных требований. Таким образом будет осуществляться экспресс-анализ всей снятой информации и формироваться банк данных. При необходимости программа может быть изложена и дополнена в процессе использования. Система автоматизации обеспечит заданное давление в диктующих точках, а также минимизацию суммарных энергозатрат на подачу воды.

Благодаря использованию высококачественных диктующих приборов становится возможным наладить в натуральных условиях систему автоматизированного управления (САУ), не останавливая технологический процесс подачи воды в сети. Главная функция САУ – мониторинг сети с целью принятия эффективных управленческих решений. САУ позволит не только экспериментально оценить в динамике влияние волнисто-шероховатой поверхности на гидравлическое сопротивление и пропускную способность труб, но и сопоставить их основные характеристики, используя полуэмпирические зависимости типа (14), (15), (16), (17) по участкам гидравлической сети, скорректировать основные теоретические зависимости и оценить затраты при эксплуатации, а также наработать огромный информационный материал по волновым сопротивлениям труб, который потребует дальнейшего обобщения и анализа.

Выводы:

1. Величина эквивалентной высоты (по модели равнотермной (песчаной) шероховатости) буржорков не может быть единственным параметром для учета гидравлических сопротивлений труб с

волнисто-шероховатой поверхностью, которые резко возрастают при длительной эксплуатации в условиях волнового движения потока жидкости.

2. Влияние волнисто-шероховатой поверхности учитывается при помощи следующих факторов: относительной высоты образований из-за коррозии и отложений - «наростов», рубцов и др., их относительного шага, длины волны или микроволны, формой и скоростью формирующихся образований на стенке, извилистостью и др.

3. Для более надежных данных по гидравлическим сопротивлениям и пропускной способности на участках труб инженерной сети, обладающих волнисто-шероховатой способностью, необходимо в колодцах (в диктующих точках) размещать измерительные датчики давлений и расходов, которые «считываются» (обрабатываются) одновременно при помощи серверов. Такая база позволит найти общие закономерности и использовать при проектировании и эксплуатации сети.

Авторы выражают благодарность студенткам ФИСПОС Жилейкиной Елене и Целик Наталье за активную помощь при оформлении данной статьи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ablott, D.E., Kline S.I. Report M.D. 5 Department of Mechanical Engineering Stanford University [Text] / D.B. Ablott, S.A. Kline. - Stanford, California, June, 1961.
2. Бузник, В.М. Интенсификация теплообмена в судовых установках [Текст] / В.М. Бузник. - Л.: Изд-во «Судостроение». 1969. - 363 с.
3. Калинин, Э.К. Интенсификация теплообмена в каналах [Текст] / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.А. Ярков. - М.: Машиностроение, 1972. - 220 с.
4. Koch, R. VDI – Forsch [Text] / R. Koch. - 1958. - 469 с.
5. Никитин, И.К., Модель стратификационного турбулентного пристеночного течения и процессы теплопереноса в нем [Текст] / И.К. Никитин, В.И. Жадан, В.Н. Доманов // Доклады Международного симпозиума по стратификационным течениям. - Новосибирск: СО АН СССР, 1972.
6. Nunner, W. Wärmeübergang und Druckabfall in rauhen Röhren [Text]/W. Nunner // DVJ, Forschungsheft. - No. 455. - 1956.
7. Шевелев, Ф.А. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах [Текст] / Ф.А. Шевелев. - М.: Госстройиздат, 1953.
8. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. - М.: Наука, 1970.

© Лукс А.Л., Крестин Е.А., Шувалов М.В.,
2013