

УДК 532.5.011.18

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРУБ С ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА И РАВНОМЕРНОЙ СПЛОШНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ ПОВЕРХНОСТИ

С. Э. Тарасевич, А. В. Щелчков, А. Б. Яковлев, А. В. Злобин

Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева, Казань, Россия

Поверхностные интенсификаторы теплоотдачи позволяют значительно увеличить теплосъем при умеренном или сопоставимом росте гидравлического сопротивления. Выделяют, как правило, два основных типа поверхностных интенсификаторов: в виде сплошной шероховатости (например, в виде резьбы) и в виде дискретной. Дискретная шероховатость в качестве способа интенсификации теплообмена при разработке высокоэффективного теплообменного оборудования часто более предпочтительна. Однако сплошная шероховатость наружной и внутренней поверхностей трубы может быть эффективна для повышения теплообмена при кипении и в других случаях. В настоящее время остаются мало исследованными вопросы гидродинамики и теплообмена в каналах с закруткой потока и шероховатостью стенок. В таких каналах можно достичь значительной интенсификации теплообмена и уменьшения температуры стенки парогенерирующего канала при парожидкостном течении за счет отбрасывания жидкой фазы под действием закрутки на шероховатую стенку.

При шероховатой поверхности стенок обтекание выступов происходит с разрушением пограничного слоя, и коэффициент сопротивления в этом случае зависит не только от числа Re , но и от относительной шероховатости $\bar{\Delta} = \Delta/d$ (d – диаметр трубы, Δ – средняя высота выступов шероховатости) [1]. Сопротивление движению жидкости или газа при ламинарном режиме обусловлено силами внутреннего трения (вязкостью), появляющимися при перемещении одного слоя среды относительно другого. Силы вязкости пропорциональны первой степени скорости потока. Благодаря преобладанию при ламинарном режиме сил вязкости даже обтекание выступов шероховатой поверхности происходит плавно. Поэтому шероховатость стенок, если она не очень велика, не влияет на сопротивление, и коэффициент сопротивления трения при этом режиме всегда зависит только от числа Рейнольдса. При увеличении числа Re начинают преобладать силы инерции, пропорциональные квадрату скорости. При этом возникает турбулентное движение, характеризующееся появлением поперечных составляющих скорости, вызывающих перемешивание жидкости (газа) во всем потоке и обмен количеством движения беспорядочно движущихся масс жидкости. Все это приводит к резкому возрастанию сопротивления движению при турбулентном режиме по сравнению с ламинарным (вместе с тем, поскольку коэффициент сопротивления ξ определяется как отношение потерь полного давления к динамическому, с уменьшением Re он всегда возрастает) [1].

Несмотря на то, что для гладких труб с возрастанием числа Re коэффициент сопротивления должен уменьшаться, в шероховатых трубах при увеличении этого числа обнаруживается увеличение коэффициента ξ при неизменной геометрической шероховатости. Объясняется это влиянием вязкого подслоя. Если толщина вязкого подслоя больше выступов, то они целиком покрываются этим слоем. При малых скоростях, характерных для вязкого подслоя, поток плавно обтекает неровности, и они не оказывают никакого влияния на характер потока. В этом случае ξ с увеличением Re

уменьшается. С возрастанием числа Рейнольдса толщина вязкого подслоя уменьшается, и при достижении определенного значения Re она может стать меньше высоты выступов. При этом выступы усиливают вихреобразование, а, следовательно, повышают потери давления, что выражается в увеличении ξ с увеличением числа Re [1]. Таким образом, трубы можно считать гладкими, пока высота шероховатых выступов меньше толщины вязкого подслоя.

Очевидно, что сопротивление, оказываемое шероховатой стенкой движению жидкости, зависит не только от формы и высоты элементов шероховатости, но также от плотности распределения шероховатостей, т.е. от числа элементов шероховатости, приходящихся на единицу площади, и, кроме того, от группировки этих элементов на поверхности. Вследствие этих обстоятельств потребовалось довольно значительное время, прежде чем удалось вывести ясные и простые законы течения в шероховатых трубах [2].

Наиболее обширные и тщательные систематические измерения в шероховатых трубах были выполнены И. Никурадзе [3]. Для своих исследований он использовал круглые трубы, внутренние стенки которых были оклеены насколько возможно плотнее песком с зернами определенного размера. Г.Шлихтинг [2] выделил отдельно следующие режимы течения в зависимости от влияния шероховатости: 1) режим без проявления шероховатости - размеры зерен, образующих шероховатость при таком гидравлически гладком режиме, столь малы, что все выступы элементов шероховатости лежат внутри ламинарного подслоя; 2) переходный режим - дополнительное, по сравнению с гладкими трубами, сопротивление возникает в основном вследствие сопротивления формы элементов шероховатости, выступающих из ламинарного подслоя в турбулентный пограничный слой; 3) режим с полным проявлением шероховатости - все элементы шероховатости выступают из ламинарного подслоя, преобладающая часть сопротивления состоит из сопротивления формы отдельных элементов шероховатости, поэтому закон сопротивления получается чисто квадратичным.

Представленные в [4] экспериментальные данные для труб с различной равномерной «непесочной» шероховатостью (образованной однозаходными и многозаходными перекрестными резками с треугольным, прямоугольным и скругленным профилями, а также в виде кольцевых выточек и сферических выступов с коридорным и шахматным расположением) имеют значительные расхождения с существующим объяснением механизма действия песочной шероховатости и теоретическими моделями пограничного слоя на шероховатой поверхности. Обычно здесь имеет место более раннее гидравлическое проявление шероховатости при турбулентном режиме, чем это следует из теоретических моделей; часто отсутствует режим гидравлически гладкого течения. При значениях $Re \leq 10^6$ практически не наблюдается интервала, где бы имел место квадратичный режим сопротивления. Для многих видов шероховатостей в ходе кривых нет монотонности, наблюдаются участки максимумов и минимумов, смещающиеся по числу Re с изменением высоты или формы элементов шероховатости. Это подтверждается и данными работы [5]. Хотя авторы [5] и говорят об автомодельности гидравлического сопротивления, однако приведенные ими результаты показывают, что наблюдаются участки минимумов и максимумов, особенно заметные при небольших высотах шероховатости. Отмеченные особенности показывают, что экстраполяция результатов исследований шероховатых труб на неизученную область определяющих параметров недопустима.

Следует отметить, что гидравлическое сопротивление труб с треугольной шероховатостью по данным [5] приблизительно в 1.5 раза меньше, чем в [4] при той же относительной высоте $\bar{\Delta}$, что можно объяснить различными масштабами течения: в [4] – $d=0.059$ м, в [5] – $d=0.017$ м. В количественном отношении расхождение с данными Никурадзе при равенстве относительной высоты шероховатости $\bar{\Delta}$ достигает для однозаходных резьб 30%, для шероховатостей в виде пирамидок и полусферических выступов (при плотном размещении) – $1.7\div 2.5$ раза [4].

Анализ, проведенный в [4-6], также показывает, что дисперсия высоты выступов при сохранении неизменной средней их высоты способствует увеличению коэффициента сопротивления во всей области Re и более раннему проявлению шероховатости.

Определяющее влияние на коэффициент ξ при одной и той же высоте выступов имеют шаг и плотность размещения элементов шероховатости [4]. При плотном расположении выступов течение над ними носит характер течения в пограничном слое. Вихри, развившиеся в зазоре между элементами шероховатости, относительно устойчивы. С увеличением расстояния между выступами увеличивается генерация вихрей на каждом элементе, усиливаются проникновение основного потока в зазор между выступами и обмен энергией между вихрями и основным потоком. Понижается также устойчивость вихрей в зазоре, увеличивается вероятность их проникновения в ядро течения. При достаточно разреженном расположении выступов течение все более приобретает характер обтекания отдельных элементов и сопротивление начинает зависеть от числа выступов на единицу длины канала и их формы. При плотном расположении выступов форма элементов влияет на генерацию турбулентности при срыве потока на кромках и на интенсивность вихрей в зазоре, что отражается на значении общего коэффициента сопротивления канала.

При равенстве высот выступов и расстояний между ними в осевом направлении по данным [4, 5] наименьшим гидравлическим сопротивлением обладают трубы с резьбовой шероховатостью треугольного профиля. Наибольшее сопротивление получено для шероховатостей в виде трехмерных выступов при многозаходной перекрестной треугольной резьбе [4], что, вероятно, связано с большей линией кромок срыва потока и большей массой жидкости, участвующей в вихревом движении между элементами шероховатости и в обмене импульсом с основным потоком. Форма трехмерных выступов и связанный с ней характер обтекания потоком отдельных элементов оказывают большое влияние на гидродинамические характеристики течения. Для тел округлой формы, как известно, коэффициент лобового сопротивления изменяется с Re вследствие изменения картины обтекания. Соответственно наиболее сложный характер зависимостей $\xi(Re)$ получен именно для труб с полусферическими выступами [4]. Для плохо обтекаемых выступов картина обтекания и коэффициент лобового сопротивления более стабильны и коэффициенты ξ шероховатых труб с такими выступами (пирамидками) при прочих равных геометрических характеристиках в меньшей степени зависят от Re .

Как упоминалось, в большинстве работ указывается, что условием наступления квадратичного режима является практически полный выход выступов шероховатости за пределы вязкого подслоя. Сопоставление полученных результатов для труб с песочной шероховатостью и труб с регулярной однородной шероховатостью показывает, что одного этого условия недостаточно для наступления квадратичного

режима. Квадратичный режим имеет место при неоднородности в форме элементов шероховатости и плотности их распределения по поверхности трубы [4].

В настоящей работе представлены результаты исследования гидродинамики однофазного (воздушного) потока в шероховатой трубе с установленной в нее скрученной лентой. Шероховатость трубы с внутренним диаметром $d=0.013$ м и длиной $L=0.66$ м достигалась нарезкой метрической резьбы с шагами $t=(0.25\dots 1.0)\cdot 10^{-3}$ м и средней высотой выступа $\Delta=(0.177\dots 0.71)\cdot 10^{-3}$ м. Профиль выступов шероховатости – треугольный (фотография на рис.1). Отборники давления на входе и выходе из рабочего участка располагались на гладких участках на расстоянии 5 мм от шероховатой поверхности. Для достоверности измерений в закрученных потоках давление на выходе определялось как среднее значение показаний четырех отборников, расположенных по периметру выходного сечения.



Рис.1. Фотография треугольного профиля поперечной шероховатости

Для сопоставления с известными теоретическими положениями было проведено экспериментальное исследование гидравлического сопротивления шероховатых труб без ленты при следующих режимных и геометрических параметрах: число Рейнольдса $Re=6000\dots 120000$; избыточное давление на входе в участок $P=0.6\dots 110$ кПа; среднеобъемный диаметр труб $d=0.13$ м, длина трубы $L=0.66$ м, $\bar{\Delta}=\Delta/d=0.012\dots 0.055$.

На основе механизма влияния песочной шероховатости стенок на гидродинамику потока можно выделить следующие режимы течения. Ламинарное течение без проявления шероховатости наблюдается при малых числах Re и безразмерной высоте шероховатости $\Delta^+ = \bar{\Delta} Re \sqrt{\xi/8} = 0\dots 5$, или, по данным работы [7], при $Re_{\Delta} < 100$ (где в модифицированном числе Рейнольдса Re_{Δ} в качестве определяющего размера выбрана высота шероховатости Δ). В настоящей работе этот режим не наблюдался. Переходный режим течения, в котором коэффициент гидросопротивления зависит как от числа Re , так и от величины $\bar{\Delta} = \Delta/d$, наблюдается в диапазоне чисел Рейнольдса Re от 7000 до 65000 для относительно мелкой шероховатости $\bar{\Delta} = 0.012\dots 0.023$ (рис.2). Его уровень совпадает с уровнем гидросопротивления песочной шероховатости в опытах Никурадзе [3]. В работе [7] границы этого режима оценивают в пределах $100 < Re_{\Delta} < 530$ для труб с технической шероховатостью, которая образуется в результате воздействия высокотемпературного потока на теплонагруженную поверхность, или вследствие коррозии металла, отложения солей и т.п. В настоящем исследовании граница перехода от переходного режима течения к режиму развитой шероховатости для относительно мелкой шероховатости $\bar{\Delta} = 0.012$ по параметру безразмерной высоты шероховатости Δ^+ совпадает с данными [7] (рис.3), а при увеличении $\bar{\Delta}$ смещается в сторону увеличения как безразмерной высоты шероховатости $\Delta^+ > 100$, так и модифицированного числа Рейнольдса ($Re_{\Delta} > 820$) (рис.4). Это связано, как отмечено в [4], с другим (двумерным упорядоченным) профилем шероховатости, в отличие от песочной и технической

шероховатости. С ростом относительной высоты $\bar{\Delta}$ от 0.023 до 0.055 наблюдается более раннее гидравлическое проявление шероховатости при турбулентном режиме течения, нежели показано в теоретических моделях [2, 3]. Граница режимов течения размывается, в исследуемом диапазоне чисел Re нет четко выраженного квадратичного режима сопротивления, что характерно для песочной шероховатости. Для этих величин относительной высоты шероховатости $\bar{\Delta}$ нет монотонности, что также согласуется с экспериментальными данными [4]. Это явление объясняется различием геометрии песочной и регулярной упорядоченной шероховатости. Песчинки представляют собой плохо обтекаемые элементы с разнообразными отклонениями от сферической формы, кроме того, им присуща локальная неоднородность плотности размещения по поверхности трубы. В результате этого режим гидравлического проявления шероховатости наступает за счет наложения различных законов изменения $\xi=f(\text{Re})$ (зависящих от формы шероховатостей и их шага), что видимо и приводит в среднем к автомодельности режима течения по гидросопротивлению [4].

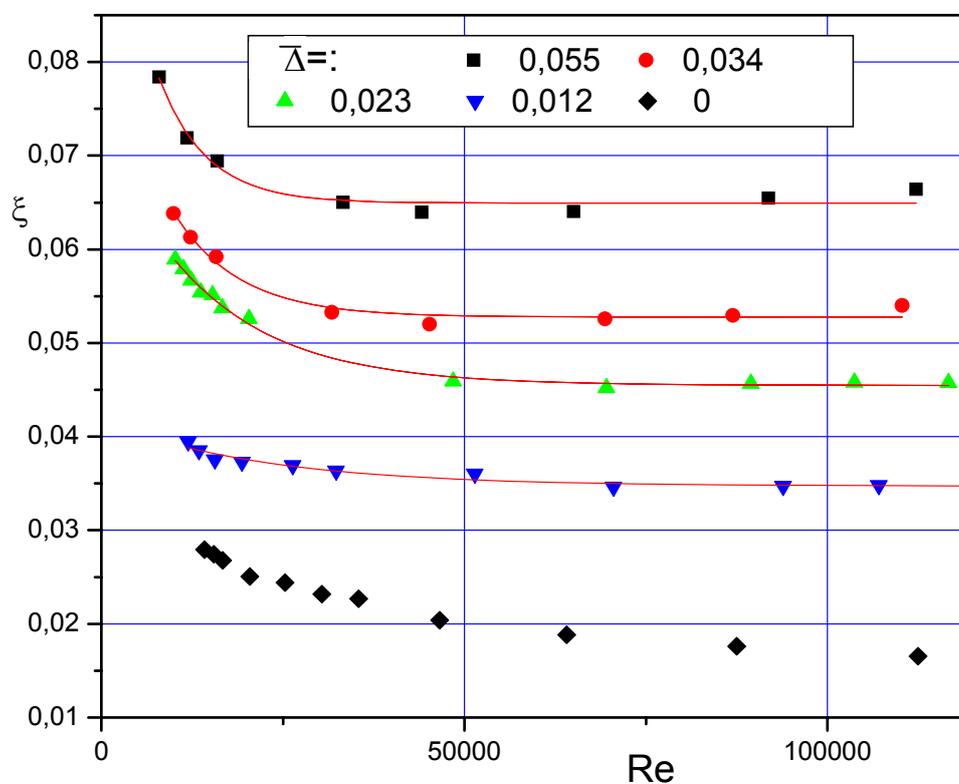


Рис.2. Зависимость гидросопротивления шероховатой трубы от числа Re: линии – обобщающие кривые по (2) (см.ниже)

В случае равномерной шероховатости, не достаточно лишь полного выхода выступов шероховатости за пределы вязкого подслоя. Кроме этого должна проявляться неоднородность как по форме элементов шероховатости, так и по плотности размещения, что характерно для песочной шероховатости, но не находит место для регулярной упорядоченной шероховатости. Первая имеет трехмерный характер, вторая – двухмерный.

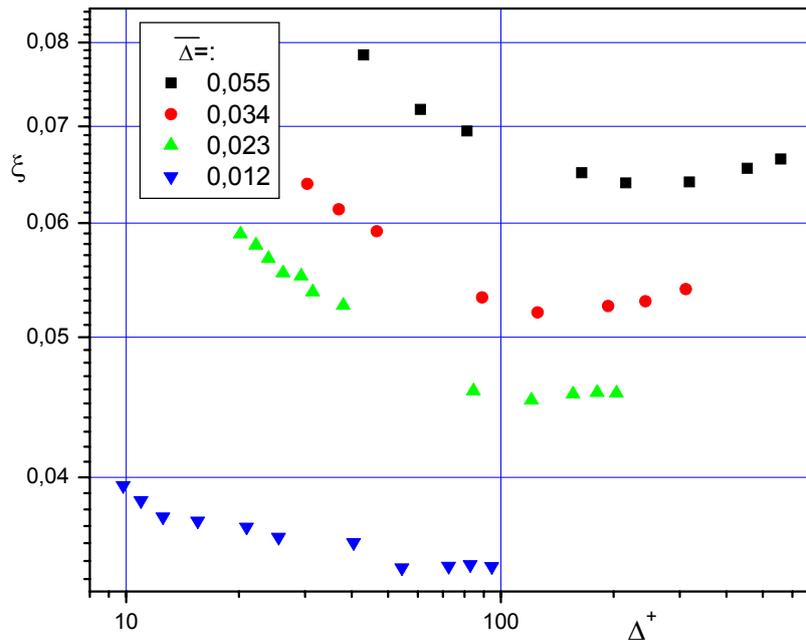


Рис.3. Зависимость гидросопротивления шероховатой трубы от безразмерной высоты шероховатости Δ^+

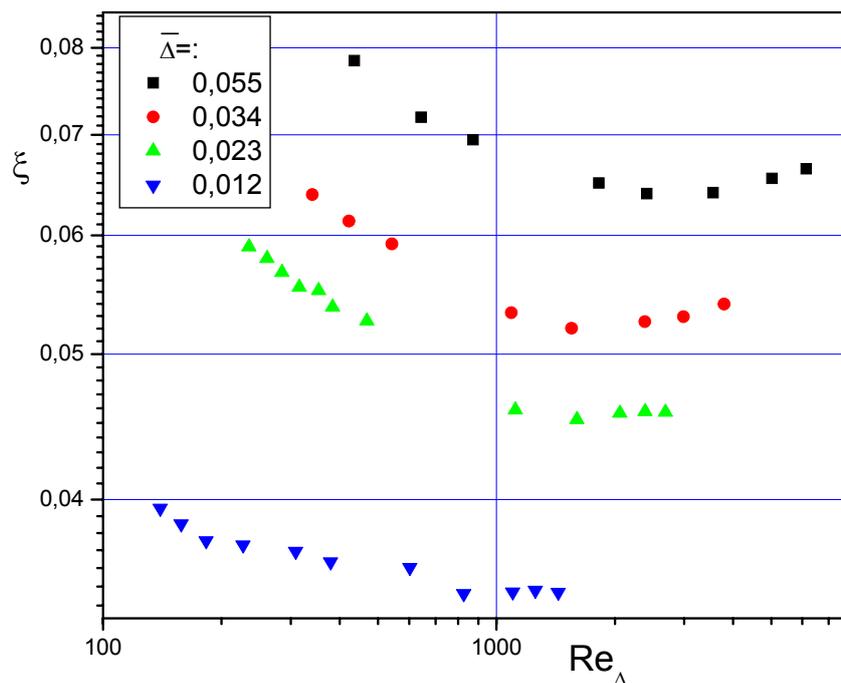


Рис.4. Зависимость гидросопротивления шероховатой трубы от модифицированного числа Re_Δ

Шлихтинг [2] предложил сравнивать песочную шероховатость с технической шероховатостью с помощью общего параметра Δ_s/d . Под эквивалентной песочной шероховатостью Δ_s/d понимается такая высота элемента песочной шероховатости Δ , при которой труба с данной шероховатостью имеет тоже гидравлическое сопротивление, что и труба с технической шероховатостью. Аналогично можно рассмотреть и сравнение песочной шероховатости с регулярной упорядоченной шероховатостью. Коэффициент гидросопротивления для всех трех режимов течения в

трубах с естественной шероховатостью хорошо описывается уравнением Колебрука и Уайта [2]:

$$\frac{1}{\sqrt{\xi}} = 1,74 - 2 \cdot \lg \left(2\Delta_s / d + 18,7 / (\text{Re} \cdot \sqrt{\xi}) \right) \quad (1)$$

Граница переходного режима в режим полного проявления шероховатости в зависимости от Δ_s / d удовлетворительно совпадает с границей перехода для естественно шероховатых труб [8]. Чем больше параметр Δ_s / d , а соответственно и относительная высота шероховатости, тем раньше происходит переход от переходного режима к режиму с полным проявлением шероховатости. Причем все три параметра Δ^+ , Re_Δ , Δ_s / d имеют согласование между собой в определении границ перехода режимов для различных видов шероховатостей.

Как видно на рис.5, экспериментальные данные авторов имеют удовлетворительное совпадение с расчетами по (1) в диапазоне $\bar{\Delta}$ от 0,034 до 0,055 с относительной погрешностью не более $\pm 7\%$. При более мелкой шероховатости $\bar{\Delta} = 0,012 \div 0,023$ отклонение достигает $\pm 25\%$, что связано с невозможностью более точного подбора величины Δ_s . В исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса наблюдается удовлетворительное совпадение по характеру распределения коэффициента гидросопротивления шероховатой трубы с данными [1, 4]. Максимальное отклонение составляет 20%, что связано с различным профилем сравниваемых шероховатостей (в опытах авторов – рассматривается треугольный профиль, а в [1, 4] - трапецевидный). Это в очередной раз доказывает, что на уровень и характер распределения гидросопротивления, большое влияние оказывает геометрический профиль шероховатости. Данное сравнение было произведено для оценки точности получаемых результатов и работоспособности установки в целом.

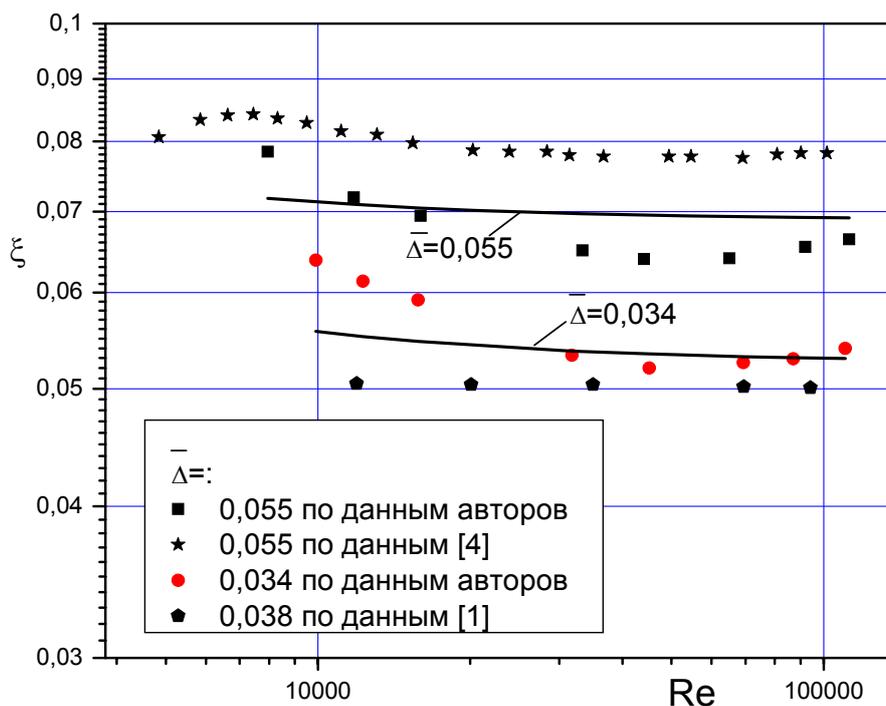


Рис.5. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по гидросопротивлению шероховатой трубы: линия – расчет по (1)

Обобщение экспериментальных данных для всех трех режимов было проведено в виде экспоненциальных зависимостей первого порядка (рис.2) с отклонением не более $\pm 8\%$ в при доверительной вероятности 0,95:

$$\xi = 0.15 + 0.06 \cdot \log \bar{\Delta} \cdot \exp\left[-\operatorname{Re}/\left(125.9 \cdot \bar{\Delta}^{-0.8}\right)\right] + 0.69 \cdot \bar{\Delta}. \quad (2)$$

Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления шероховатых труб со вставленной скрученной лентой проводилось при следующих режимных и геометрических параметрах: $\operatorname{Re}=3000\dots 80000$; $P=0.1\dots 0.25$ МПа; $S/d=2.5\dots 7$ (S - шаг закрутки ленты при повороте на 180°). Число Re и коэффициент ξ определялись по эквивалентному гидравлическому диаметру d_e канала с лентой [9]. Зависимость гидросопротивления от режимных и безразмерных параметров шероховатости и скрученной ленты для некоторых S/d представлены на рис.6.

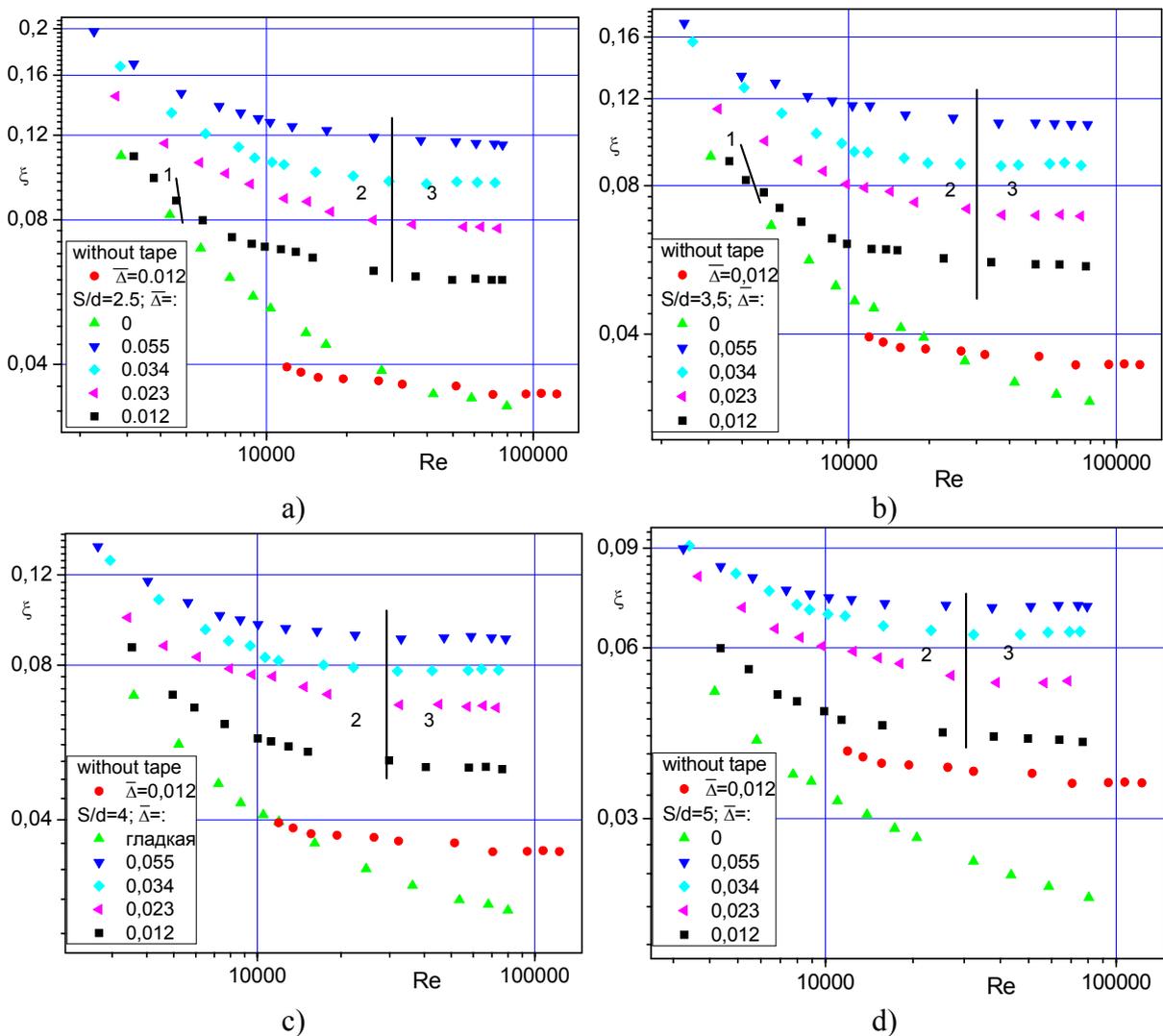


Рис.6. Гидравлическое сопротивление шероховатых труб со скрученной лентой: а) $S/d=2.5$, б) $S/d=3.5$, в) $S/d=4$, г) $S/d=7$

Анализ этих данных показывает, что при числах $Re < 4600$ для $S/d=2,5$ и $Re < 4400$ для $S/d=3,5$ наблюдается ламинарный режим с макровихрями без проявления шероховатости (область 1). Уровень гидросопротивления шероховатой трубы с закруткой совпадает с уровнем гидросопротивления гладкой трубы с закруткой при одинаковой степени закрутки. С увеличением относительной шероховатости $\bar{\Delta}$ и увеличением интенсивности закрутки (уменьшением S/d) граница режима смещается в сторону уменьшения числа Re . Это объясняется совместным действием закрутки и шероховатости. С одной стороны, выступы шероховатости столь малы, что все они находятся внутри вязкого подслоя и обтекаются без отрыва. С увеличением $\bar{\Delta}$ выступы шероховатости выступают за вязкий подслой, соответственно увеличивается пристенная турбулизация. С другой стороны, чем интенсивнее закрутка, тем меньшие значения принимает критическое число Рейнольдса $Re_{кр}$ [9], а, следовательно, наступает более ранний переход от ламинарного режима с макровихрями без проявления шероховатости, к переходному режиму с макровихрями и проявлением шероховатости (область 2) (рис.7).

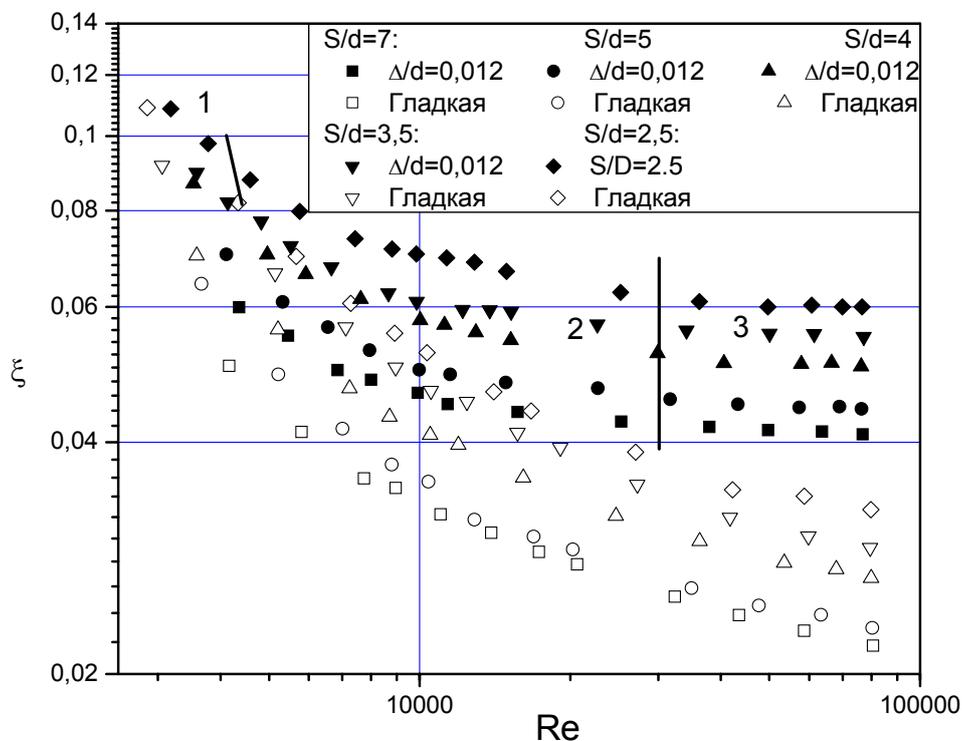


Рис.7. Сравнение гидросопротивления труб с упорядоченной регулярной поперечной шероховатостью $\bar{\Delta}=0,012$ с закруткой с гладкой трубой с закруткой

В области 2 на уровень гидросопротивления совместное влияние оказывают: относительная шероховатость $\bar{\Delta}$, степень закрутки S/d и число Re . Механизмы перехода от ламинарного режима течения с макровихрями к переходному режиму с макровихрями описаны выше. Верхней границей переходного режима с макровихрями, как видно на рис.6, является число $Re_{кр}^{п.п} \approx 30000$. При увеличении числа Рейнольдса наступает автомодельный режим течения (область 3), при котором коэффициент гидросопротивления не зависит от числа Рейнольдса.

Обобщение экспериментальных данных было произведено отдельно для ламинарного режима с макровихрями и переходного режима с макровихрями в диапазоне чисел

Рейнольдса $Re=3000\dots30000$ аналогично (2), в виде экспоненциальной зависимости от числа Re с отклонением не более $\pm 10\%$ (рис.8):

$$\xi = (S/d)^{-[0,0023 \cdot \exp(\bar{\Delta}/0,0143)+0,39]} \cdot [0,16 \cdot \exp(-Re/3700) + 0,065 + 2,3\bar{\Delta}]. \quad (3)$$

Обобщающая зависимость при автомодельном режиме ($Re=30000\dots80000$) с отклонением ± 10 представлена в виде:

$$\xi = 0,5 \cdot \frac{(\Delta/d)^{0,4}}{(S/d)^{0,4}} = 0,5 \cdot \left(\frac{\Delta}{S}\right)^{0,4}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что коэффициент ξ при автомодельном режиме зависит от безразмерного комплекса Δ/S .

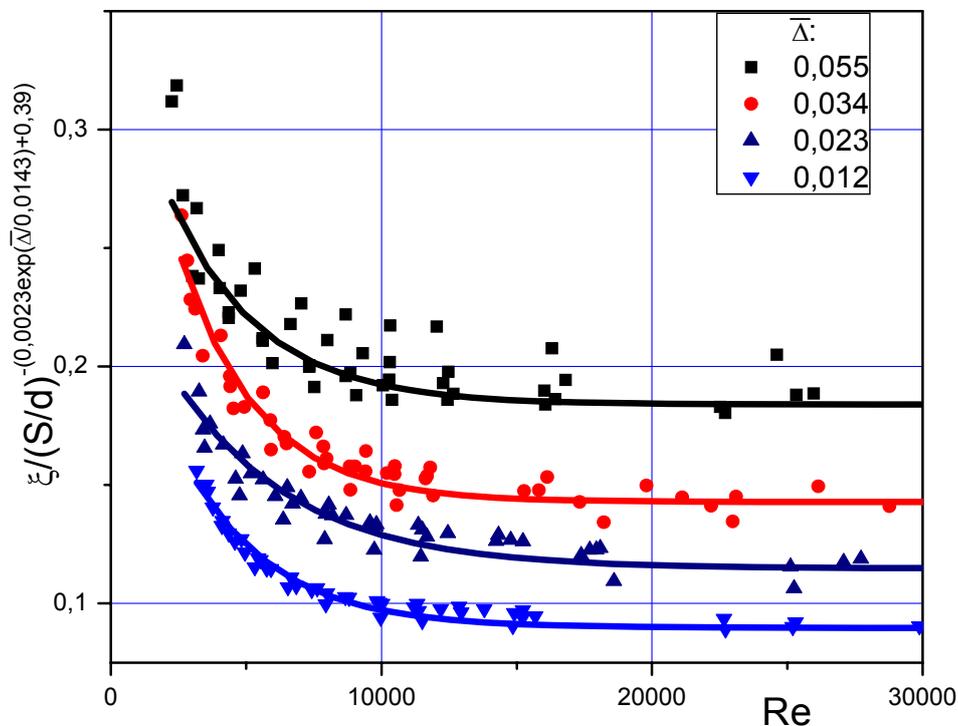


Рис.8. Зависимость гидросопротивления шероховатых каналов с закруткой при ламинарном и переходном режимах с макровихрями от числа Рейнольдса Re

Таким образом, при исследовании гидравлического сопротивления труб с равномерной сплошной шероховатостью поверхности и вставленной скрученной лентой выявлены режим без проявления шероховатости, переходный режим ($Re < 30000$) и автомодельный режим ($Re > 30000$). Получены обобщающие зависимости для ламинарного и переходного режимов в виде $\xi = f(Re, S/d, \bar{\Delta})$ и для автомодельного режима - $\xi = f(\Delta/S)$.

Ссылки

- [1] Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 464 с.
- [2] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Перевод с немецкого под ред. Л.Г. Лойцянского. М.: «Наука», 1969, 744 с.
- [3] Никурадзе И. Закономерности турбулентного движения в гладких трубах // Проблемы турбулентности /Под ред. М.А. Великанова и Н.Г. Швейковского. М., 1936, с.75-150.
- [4] Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Бобков В.П., Сабелев Г.И., Таранов Г.С. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. М.: Атомиздат, 1978, 296 с.
- [5] Исаченко В.П., Агабабов С.Г., Галин Н.М. Экспериментальное исследование теплоотдачи и гидравлического сопротивления при турбулентном течении воды в трубах с искусственной шероховатостью // Труды МЭИ «Теплообмен и гидравлическое сопротивление», 1965, вып.53, с.27-37.
- [6] Миллионщиков М.Д. Турбулентные течения в пристеночном слое и в трубах // Атомная энергия, 1970, т.28, вып.3, с.207-219.
- [7] Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике // Под ред. В.С. Авдеевского, В.К. Кошкина. М.: Машиностроение, 1975. 491-501 с.
- [8] Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Соловьев С.Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках: Учебное пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. // М.: Издательство МЭИ, 2003, 548 с.
- [9] Щукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. М.: Машиностроение, 1970, 331 с.