

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

На правах рукописи

Писаревский Максим Игоревич

**ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА С ШЕРОХОВАТОЙ СТЕНКОЙ И МЕТОДИКИ ИХ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и
вывод из эксплуатации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Научный руководитель:

Федосеев Вячеслав Николаевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры «теплофизика» НИЯУ МИФИ, г. Москва

Научный консультант:

Корсун Александр Сергеевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры «теплофизика» НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты:

Микитюк Константин Олегович
кандидат технических наук, профессор (Phd) Института имени Пауля Шеррера, Швейцария.

Соловьев Сергей Леонидович
доктор технических наук, профессор, научный руководитель АО «ВНИИАЭС» ГК Росатом, научный руководитель приоритетного направления научно-технологического развития ГК Росатом «Атомные станции малой мощности.

Верещагина Татьяна Николаевна
доктор технических наук, главный научный сотрудник ОЯЭ АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск.

Защита состоится «22» декабря 2021 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета «МИФИ.01.03» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.


С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Просим принять участие в работе совета и прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь Диссертационного совета

к.т.н.

 Куликов Евгений Геннадьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Для ядерных энергетических установок характерны высокие скорости прокачки теплоносителя, питательной воды и пара, при которых на гидравлическое сопротивление каналов энергетического оборудования существенное влияние начинает оказывать шероховатость стенок этих каналов.

Шероховатые поверхности принято классифицировать по типу на искусственные и естественные. Естественная шероховатость обусловлена технологией производства или появляется в процессе эксплуатации из-за осаждения на стенках каналов твердых примесей потока, коррозии и эрозии материалов. Искусственная шероховатость наносится на поверхность канала специально. Примерами искусственной шероховатости являются резьбы, навивки, выступы, ямки и так далее. Параметры выступов шероховатости описаны в ГОСТ.

В процессе эксплуатации ядерных реакторов на поверхностях тепловыделяющих элементов, конструктивных элементов ТВС, трубопроводов второго контура образуется естественная шероховатость. Авторами работы [1] проведены измерения поверхностей трубопроводов обвязки подогревателя высокого давления, изготовленных из стали 12X18H10T, и трубопроводов стали 20, согласно которым высота образующейся естественной шероховатости может достигать 250 мкм. Автором диссертационного исследования [2] обнаружено наличие отложений на тепловыделяющих и конструктивных элементах ТВС на энергоблоках №3,4 Нововоронежской АЭС. Отложения состояли из продуктов коррозии, дебрис-частиц и органических веществ, они явились причинами снижения расхода теплоносителя через кассеты в процессе эксплуатации АЭС.

Интенсификаторы теплообмена в форме поперечных искусственно созданных выступов могут применяться для повышения энергетической эффективности активных зон реакторов, в том числе типа ВВЭР – 1000 [3,4] и НТР [5], паровых турбин АЭС и ТЭС, систем генерации тепла паровых турбин АЭС и ТЭС, авиационных ГТД и так далее [6,7]. Эффективность используемой геометрии искусственной шероховатости характеризуется ростом коэффициента теплоотдачи в шероховатом канале в сравнении с гладким каналом, на фоне роста коэффициента гидравлического сопротивления. При этом наиболее эффективной является та геометрия, для которой отношение роста теплоотдачи шероховатого канала по сравнению с теплоотдачей гладкого канала к соответствующему росту его гидравлического сопротивления $\frac{\alpha_{ш}}{\alpha_{гл}} / \frac{\lambda_{ш}}{\lambda_{гл}}$ является наибольшим. Вопросу расчета коэффициента теплоотдачи $\alpha_{ш}$ каналов с искусственной

шероховатостью посвящено большое количество научных работ, которые упоминаются в обзорных публикациях [6,8], на фоне небольшого внимания к методике расчета коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda_{ш}$ во всех областях турбулентного течения теплоносителя.

Важной особенностью энергетического оборудования ЯЭУ является широкое применение каналов со сложной геометрией, например, кольцевых каналов, поперечно и продольно обтекаемых пучков труб и топливных элементов. В таких каналах шероховатость стенок может изменяться по периметру. Например, в кольцевом канале противоположные стенки могут иметь разную шероховатость. Поэтому проектирование энергетического оборудования ЯЭУ нуждается в надежных методиках расчета гидравлического сопротивления каналов, учитывающих как сложность геометрии, так и изменение граничных условий обтекания по периметру каналов.

Существует несколько подходов к расчёту гидравлического сопротивления каналов с шероховатыми стенками $\lambda_{ш}$. К первому относится метод эквивалентной песочной шероховатости ($\Delta_{эКВ}$). Главным его недостатком является общепринятый факт недостаточности использования одного параметра для описания всех видов выступов шероховатости [6,7]. Кроме того, без проведения эксперимента предсказать значение $\Delta_{эКВ}$ для заданной шероховатости невозможно и его использование не обеспечивает достоверные значения коэффициента гидравлического сопротивления в переходной области сопротивлений.

Ко второму подходу относятся численные расчёты. Из – за отсутствия подробной информации о потоке использование прямого численного моделирования (DNS) в инженерных расчётах каналов с дискретными выступами затруднительно и нецелесообразно. Некоторым преимуществом по сравнению с DNS обладают численные расчеты с использованием моделей турбулентности (RANS). В общем случае расчёт сложного течения требует мелкой «сетки» и большого количества времени, а недостаток экспериментальных данных о тонкой структуре потока не позволяет точно задать начальные и краевые условия течения для построения универсальной модели [6,9]. Кроме того, величина несовпадения результатов расчёта и экспериментальных данных часто не соответствуют сложности модели и вложенными в расчёт затратами [6,10,11].

К третьему подходу относится методика, основанная на детальном анализе локальной гидродинамической картины около отдельного выступа шероховатости и между двумя соседними выступами [12,13]. К недостатку подхода относится сложность изучения гидродинамической картины в первую очередь из-за ее масштабов и количества значимых параметров, требуемых для ее описания. Кроме того, на данный момент, подход обладает невысокой точностью расчета коэффициента гидравлического сопротивления, ошибка может достигать 40 % [14].

К четвертому подходу относится инженерная методика, основанная на интегральных характеристиках. В ней влияние выступов шероховатости на поток рассматривается в среднем по длине канала. Под их влиянием происходит изменение профиля скорости, который претерпевает изменения, описываемые второй константой

$$\Phi\left(\frac{kV_*}{\nu}\right) = \frac{\bar{u}}{V_*} - 2,5 \ln \frac{y}{k}, \quad (1)$$

где k – высота выступов шероховатости; V_* – динамическая скорость, ν – кинематическая вязкость, \bar{u} – средняя скорость, y – расстояние от стенки.

Как отмечено в работах [8,15] получение обобщающих зависимостей Φ от параметров формы выступов шероховатости, угла обтекания и режима течения теплоносителя позволит решить задачу определения гидравлического сопротивления каналов с шероховатыми стенками. Подобного рода зависимости можно определить посредством измерения профиля скорости в трубе с шероховатыми стенками или по измеренному перепаду давления в канале с использованием формулы Дарси-Вейсбаха.

По данным [16] для песочной шероховатости расчёт второй константы универсального профиля скорости через коэффициент гидравлического сопротивления совпадает со значениями, полученными по измерению профиля скорости в трубе, что определяет выбор экспериментального метода. Для проведения исследования влияния шероховатости на коэффициент гидравлического сопротивления кольцевой канал является более универсальным каналом, по сравнению с круглой трубой, по следующим причинам. Во-первых, технологически проще контролировать и исследовать наносимую шероховатость на внешнюю поверхность. Во-вторых, кольцевой канал является имитационной моделью эквивалентной ячейки тепловыделяющего элемента. В-третьих, разработанная методика и полученные экспериментальные данные могут быть применены в коаксиальных теплообменниках типа «труба в трубе».

В настоящее время в литературе существуют аппроксимационные формулы расчета $\lambda_{ш}(Re)$ кольцевого канала с вставленными лентами и шероховатым стержнем, которые применимы только в области геометрий и чисел Re проведенных исследователями экспериментов. Коэффициент гидравлического сопротивления такого кольцевого канала будет больше, чем у гладкого, но меньше, чем у кольцевого канала с двумя шероховатыми стенками. В работе [17] предложен метод преобразования течения в кольцевом канале с шероховатым стержнем и гладкой трубой. Согласно нему по измеренному в эксперименте коэффициенту гидравлического сопротивления кольцевого канала λ определяется линия нулевых касательных напряжений r_0 и коэффициенты гидравлического сопротивления гладкого λ_1 и шероховатого λ_2 слоев. В работе [18] введен

коэффициент K_3 , определяющий связь между $\frac{\lambda_2}{\lambda_0(Re_2)}$ и $\frac{\lambda_1}{\lambda_0(Re_1)}$, где λ_0 – коэффициент гидравлического сопротивления по формуле Прандтля. Недостатками предлагаемых методов является следующее. Во-первых, наличие дополнительных эмпирических коэффициентов, определяемые из экспериментов и громоздкие вычислительные формулы. Во – вторых, не решают обратную задачу, а именно по известным сопротивлениям слоев λ_1 и λ_2 нельзя рассчитать коэффициент гидравлического сопротивления кольцевого канала в целом λ . В – третьих, они не апробированы для случаев шероховатой трубы и гладкого стержня, и полностью шероховатого кольцевого канала. Более подробно оба подхода проанализированы в главе 1 текста диссертации.

Целью работы является разработка основных положений модели взаимодействия турбулентного потока с шероховатой стенкой и создание расчётной методики для определения коэффициента гидравлического сопротивления при течении однофазного теплоносителя в кольцевом канале с шероховатыми стенками.

Для достижения поставленных целей решены следующие задачи.

1. разработаны основные положения новой полуэмпирической модели взаимодействия однофазного турбулентного потока с шероховатой стенкой и определены ее параметры;

2. разработан и собран экспериментальный стенд для исследования гидравлического сопротивления однофазного теплоносителя в трубах и кольцевых каналах с искусственной шероховатостью на стенках в широком диапазоне режимных параметров, проведены экспериментальные измерения, обработаны полученные данные;

3. разработана и апробирована методика расчета коэффициента гидравлического сопротивления плоского канала с различной шероховатостью на стенках при турбулентном течении теплоносителя;

4. разработана и апробирована методика определения параметров модели механического взаимодействия турбулентного потока с шероховатой стенкой по данным коэффициента гидравлического сопротивления кольцевого канала с шероховатыми стенками;

5. получено обобщающее соотношение расчета коэффициента гидравлического сопротивления в плоском канале, круглой трубе и эквивалентной ячейки упаковки стержней с произвольной шероховатостью на стенках при течении однофазных потоков в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

Научная новизна работы.

1. разработана новая полуэмпирическая модель взаимодействия однофазного турбулентного потока с шероховатой стенкой;

2. разработана и апробирована новая методика расчета коэффициента гидравлического сопротивления плоского канала с различной шероховатостью на стенках при турбулентном течении теплоносителя;

3. разработана и апробирована новая методика определения параметров модели механического взаимодействия турбулентного потока с шероховатой стенкой по данным коэффициента гидравлического сопротивления кольцевого канала с различной шероховатостью на стенках.

4. впервые получено обобщающее соотношение для расчета коэффициента гидравлического сопротивления в плоском канале, круглой трубе, кольцевом канале и эквивалентной ячейки упаковки стержней с произвольной шероховатостью на стенках при течении однофазных потоков в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

Практическая значимость работы.

1. Разработанные методики, позволяющие рассчитать коэффициент гидравлического сопротивления λ плоского и кольцевого каналов с различной шероховатостью на стенках при турбулентном течении однофазного теплоносителя, могут быть применены при проектировании теплообменных аппаратов различного назначения, например теплообменника типа «труба в трубе»;

2. Разработаны основные положения модели взаимодействия турбулентного потока с шероховатой стенкой, основанной на вариации второй константы универсального профиля скорости в зависимости от числа Re и геометрических параметров выступов. Развитие предлагаемой модели позволит повысить точность инженерных методик определения коэффициента гидравлического сопротивления каналов и программ численного расчета;

3. Получены новые экспериментальные данные, которые могут быть использованы исследователями для дальнейшего изучения и решения проблем гидравлики шероховатых каналов;

4. Модель, методики и полученные экспериментальные данные могут быть использованы в учебном процессе в высших учебных заведениях.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Основные идеи и положения полуэмпирической модели механического взаимодействия турбулентного потока с шероховатой стенкой, и результаты ее применения в каналах с шероховатыми стенками.

2. Результаты экспериментальных исследований, полученные значения коэффициента гидравлического сопротивления кольцевого канала с шероховатыми стенками.

3. Разработанная методика расчёта коэффициента гидравлического сопротивления кольцевого канала с шероховатыми стенками при турбулентном течении теплоносителя в зависимости от кривизны канала.

4. Разработанная методика определения параметров модели механического взаимодействия турбулентного потока с шероховатой стенкой по данным коэффициента гидравлического сопротивления кольцевого канала с различной шероховатостью на стенках.

5. Впервые полученная обобщающая зависимость для расчета коэффициента гидравлического сопротивления при течении однофазного теплоносителя в плоском канале, круглой трубе, кольцевом канале и пучках гладких труб с произвольной шероховатостью на стенках в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

Достоверность научных положений, результатов и выводов.

Достоверность данных, получаемых с помощью разработанных модели и методик, подтверждается их согласованием с результатами классических экспериментов известных ученых, с результатами собственных проведенных экспериментальных измерений, со значениями из теплогидравлических справочников. При проведении экспериментов использовалось современное точное оборудование.

Апробация работы.

Полученные основные результаты докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных конференциях и школах: Научная сессия НИЯУ МИФИ -2015 (г. Москва, 2015 г.); 4,6,7 Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» (г. Москва, 2015 – 2018 г.); Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (г. Москва, 2017 г.); Международная конференция молодых специалистов, ученых и аспирантов по физике ядерных реакторов «Волга – 2018» (г. Москва, 2018 г.); Российская национальная конференция по теплообмену «РНКТ-7» (г. Москва, 2018 г.). Доклад признан лучшим стендовым докладом по секции «Дисперсные потоки и пористые среды»; Международная молодежная школа-конференция по ядерной физике и технологиям, НИЯУ МИФИ (г. Москва, 2020г.).

Личное участие автора.

Проанализированы описанные в литературе результаты исследований по гидравлическому сопротивлению однофазных потоков в каналах с непрерывной искусственной и естественной шероховатостью на стенках и в каналах со скрученными лентами. Совместно с научным руководителем и научным консультантом сформулированы основная цель и задачи исследования.

Разработана модель механического взаимодействия турбулентного потока с шероховатыми стенками. Разработаны методики расчета коэффициента гидравлического сопротивления плоского и кольцевого каналов с различной шероховатостью на стенках. Спроектированы рабочие участки, собран экспериментальный стенд для исследования гидравлического сопротивления в шероховатых трубах и кольцевых каналах, проведены экспериментальные исследования, обработаны и проанализированы полученные данные.

Автор выражает благодарность коллективу кафедры №13 «Теплофизика» НИЯУ МИФИ, в частности, научному руководителю доценту, кандидату технических наук Федосееву Вячеславу Николаевичу; доценту, кандидату технических наук Корсуну Александру Сергеевичу за идеи, положенные в основу диссертации, ценные методические советы и помощь в подготовке диссертации.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 7 печатных статей, 6 из которых статьи, опубликованные в журналах, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus, 1 статья - в рецензируемом журнале, рекомендованном ВАК РФ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 123 наименований. Работа изложена на 107 страницах, содержит 41 рисунок и 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, кратко описаны полученные результаты.

Первая глава диссертации посвящена литературному обзору по гидравлическим расчётам каналов различного сечения с гладкими и шероховатыми стенками. Проведенный сравнительный анализ расчётных соотношений коэффициента гидравлического сопротивления гладких кольцевых каналов показал неопределенность в информации, расхождение данных известных ученых [19,20]. Анализ литературных источников по шероховатым поверхностям продемонстрировал сильную зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от типа и геометрии выступов. Использование только высоты выступа шероховатости недостаточно для получения достоверной гидравлической характеристики канала. Кроме того, при использовании шероховатостей одного типа и геометрии расчётные методики могут давать значения коэффициента гидравлического сопротивления, различающиеся вплоть до 50 %. В результате выполненного литературного анализа подтверждена актуальность данной работы и обоснован

выбор целей и задач исследования, направленных на разработку полуэмпирической модели взаимодействия турбулентного потока с шероховатой стенкой и методики расчёта коэффициента гидравлического кольцевого канала с различной шероховатостью на стенках.

Во **второй главе** описаны основные положения модели взаимодействия турбулентного потока с шероховатой стенкой. К ним относится следующее:

– распределение скорости в зоне развитой пристенной турбулентности около гладкой и шероховатой стенки описывается логарифмическим законом (2) при постоянном значении константы Кармана.

$$\frac{u_x}{V_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{\Delta} + \Phi \left(\frac{kV_*}{\nu} \right) \quad (2)$$

Его использование для описания распределения скорости по всему сечению трубы позволяет получить приемлемое значение интегрального параметра - коэффициента гидравлического сопротивления гладкого канала.

– Для шероховатых каналов различают три основных режима турбулентного течения: гладкий, переходной, автомодельный. Границы между гладким и переходным режимами и наличие автомодельной области зависит от геометрии выступов.

– При больших безразмерных высотах шероховатости $\tilde{\delta} = \frac{kV_*}{\nu}$ реализуется автомодельный режим, или режим полного проявления шероховатости. В этом режиме значение второй константы логарифмического закона $\Phi(\tilde{\delta})$ достигает предельного значения, не зависящего от вязкости. Предельное значение предлагается называть фактором формы шероховатости $\Phi_{ш}$. Физический смысл фактора формы заключается в том, что его численное значение определяет уровень скорости на границе шероховатого выступа в единицах динамической скорости V_* .

Для трубы, с использованием логарифмического профиля скорости, получено уравнение (3), позволяющее рассчитать коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\sqrt{8/\lambda_{тр}} = 2,5 \ln \frac{r_0}{k} + \Phi(\tilde{\delta}) - 3,75 \quad (3)$$

Каждому режиму турбулентного течения соответствует определённый вид функции второй константы логарифмического профиля $\Phi(\tilde{\delta})$. В настоящее время наиболее изученной является песочная шероховатость по форме И.Никурадзе. Для нее $\Phi(\tilde{\delta})$ предлагается определять как:

$$\Phi(\tilde{\delta}, \Phi_{ш}) = \begin{cases} \Phi_r = 2,5 \ln \tilde{\delta} + 5,5, & \tilde{\delta} \leq 3 \\ \Phi_r (1 - \varphi) + \Phi_{ш} \varphi, & 3 \leq \tilde{\delta} \leq 70, \\ \Phi_{ш} = 8,48, & \tilde{\delta} \geq 70 \end{cases} \quad (4)$$

где φ - переходная функция, изменяющаяся от 0 до 1. Зависимость, аппроксимирующая $\varphi(\tilde{\delta})$, представляется в виде

$$\varphi(\tilde{\delta}) = 1 - (1 - \alpha)e^{-k_1(\tilde{\delta} - \tilde{\delta}_0)} - \alpha e^{-k_2\tilde{\delta}}$$

где $\tilde{\delta}_0$ - значение безразмерной шероховатости, при котором начинается переходный режим. Для песочной шероховатости $\alpha=0,5$, $k_1 = 0,2$, $k_2 = 0,06$, $\tilde{\delta}_0 = 3$. Для искусственных шероховатостей значение α, k_1, k_2 переходной функции может быть другим.

Результаты проведенных расчетов по формуле (3) с учетом (4) показаны на рисунке 1. Они демонстрируют высокую степень соответствия экспериментальным данным, отклонение для всех $\frac{r_0}{k}$, кроме $\frac{r_0}{k} = 15$, не превышает 5%. Для $\frac{r_0}{k} = 15$ отклонение в начале переходного режима достигает 12 %. Важно отметить хорошее описание характерных минимумов в зависимости $\lambda_{гр}(Re)$.

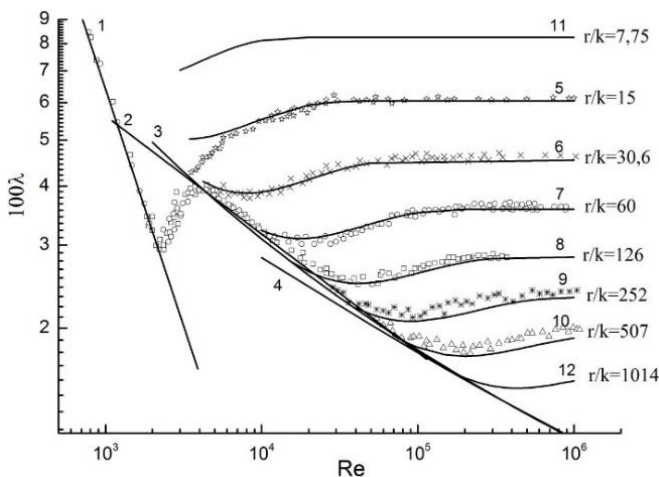


Рисунок 1. Гидравлическая характеристика труб с песочной шероховатостью на стенках: 1 – ламинарный режим течения; 2-4 – «гладкий» турбулентный режим по разным формулам из справочника [19]; 5-10 – расчетные кривые по формуле (3) с учётом (4); 11,12 – расчетные кривые по формуле (3) с учетом (4) для

$$\frac{r_0}{k} = 7,75 \text{ и для } \frac{r_0}{k} = 1014.$$

Согласно предлагаемой модели для произвольной типа и геометрии выступа шероховатости вторая константа $\Phi = \Phi(\tilde{\delta}, \Phi_{ш})$, а фактор формы шероховатости $\Phi_{ш} = \Phi_{ш}\left(\frac{k}{s}, \Pi\right)$, где Π – пористость шероховатого слоя. В настоящее время среди искусственных шероховатостей наиболее изучена двумерная шероховатость в виде прямоугольных выступов. Для нее получена зависимость в виде

$$\Phi_{ш} = \begin{cases} 3,5 + 6,6 \exp\left(-A \frac{s}{k}\right), \frac{s}{k} \leq \left(\frac{s}{k}\right)_{гр} \\ B \frac{s}{k} + 3, \frac{s}{k} > \left(\frac{s}{k}\right)_{гр} \end{cases},$$

где $A = 0,4\Pi + 0,1$; $B = 0,77\Pi^{0,7}$ - эмпирические коэффициенты, $\left(\frac{s}{k}\right)_{гр} = 8,14\Pi^{-0,67}$ - граничное значение $\frac{s}{k}$, при котором достигается наименьшее значение $\Phi_{ш}$, соответственно, максимальное значение коэффициента сопротивления λ .

Для естественных шероховатостей в переходной области в первом приближении рекомендована зависимость:

$$\Phi(\delta, \Phi_{ш}) = \Phi_{ш} - 2,5 \ln \left(1 + \frac{1}{\delta} \exp(0,4\Phi_{ш} - 2,2) \right)$$

В третьей главе изложено описание созданного на кафедре №13 НИЯУ МИФИ экспериментального гидравлического стенда, схема которого представлена на рисунке 2.

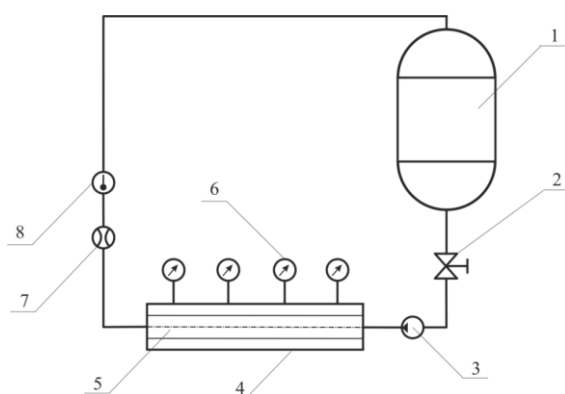


Рисунок 2. Схема гидродинамического стенда:
1 - Бак с теплоносителем, 2 - вентиль, 3 - насос,
4 - наружная труба, 5 - стержень, 6 - манометр,
7 - расходомер, 8 - термометр.

На прямом горизонтальном участке гидравлического стенда монтировались изготовленные специальные кольцевые каналы, схема которых представлена на рисунке 3.

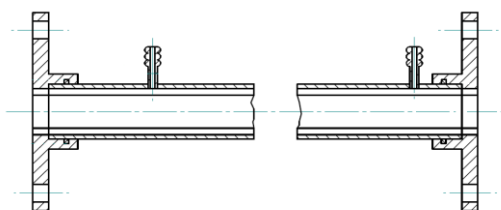


Рисунок 3. Рабочий участок.

Стержень коаксиально закреплялся в круглой трубе из нержавеющей стали, имеющей внутренний диаметр 21 мм, толщину стенки 2 мм, длину 724 мм. Установка трубы в контур осуществлялась с помощью фланцев.

В эксперименте циркуляция воды обеспечивалась многоступенчатым вертикальным насосом Calpeda MXV 40–805 с максимальным расходом 13 м³/ч и напором до 59,0 м. Измерение расхода воды производилось ультразвуковым расходомером «Акрон-01» и дублировалось

ротаметром ZYIA серии LZB-VA10. Погрешность измерений составляла 1,5-2%. Температура измерялась термопарой хромель-алюмель с погрешностью $\pm 2,5$ °С. Измерения давления проводились образцовыми манометрами с погрешностью не более 6 % согласно ГОСТ 1701-75. С использованием полученных в эксперименте значений температуры, скорости теплоносителя и перепада давлений по длине экспериментального участка по формуле Дарси-Вейсбаха рассчитывался коэффициент гидравлического сопротивления кольцевого канала:

$$\lambda_{\text{эксп}} = \frac{2d_{\text{г}} \Delta P S^2}{l \rho G^2}$$

Для повышения точности проведенных экспериментов по длине рабочего участка установлены четыре отбора давления. Первый отбор давления располагался на расстоянии 110 мм от входа в рабочий участок. Таким образом, перепад давления определялся на длине кольцевого канала $l = 595$ мм. Относительная величина гидродинамической стабилизации потока составляет $l_{\text{ну}}/d_{\text{г}} = 28$ калибров.

В процессе исследования были проведены эксперименты на 12 рабочих участках, которые были классифицированы по типам. К первому типу отнесен кольцевой канал с гладкими стенками. Ко второму типу отнесены рабочие участки, в которых на стержне нанесена искусственная шероховатость определенной геометрии, поверхность трубы является гладкой. К третьему типу отнесены рабочие участки, в которых поверхность стержня является гладкой, а на поверхность трубы нанесена искусственная шероховатость определенного типа. К четвертому типу отнесены рабочие участки, в которых на обеих поверхностях кольцевого канала присутствует искусственная шероховатость. Геометрия исследуемых двумерных шероховатостей представлена на рисунке 4. Характеристики экспериментальных каналов представлены в таблице 1. Размеры выступов трапецевидной и прямоугольной шероховатостей выбраны по причине того, что для них из литературы [19] известны значения эквивалентной песочной шероховатости $\Delta_{\text{экв}}$.

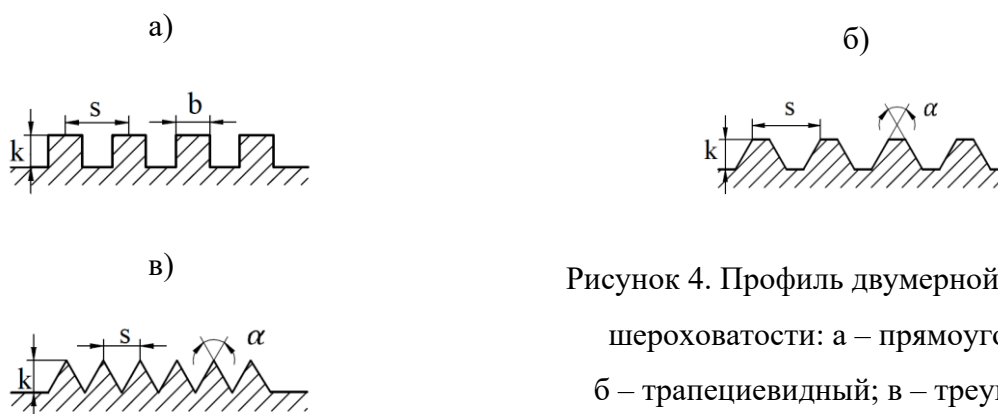


Рисунок 4. Профиль двумерной резьбовой шероховатости: а – прямоугольный; б – трапецевидный; в – треугольный.

Таблица 1. Геометрические характеристики рабочих участков

Тип	№	Форма выступа	k, мм	s, мм	$\Delta_{\text{экв}}$	D_1 , мм	D_2 , мм	θ
1	1	-	-	-	-	14,7	21	0,7
2	1	трапеция	0,2	1,06	0,343	17	21	0,81
	2	прямоугольник	0,24	0,5	0,182	17	21	0,81
	3	треугольник	0,0504	0,2	-	17	21	0,81
	4	треугольник	0,062	0,4	-	17	21	0,81
3	1	трапеция	0,2	1,06	0,343	17	21	0,81
	2	трапеция	1	1,6	1	17	21	0,81
	3	трапеция	1	1,6	1	14,7	21	0,7
4	1	трапеция	1	1,6	1	17	21	0,81
	2	трапеция	0,2	1,06	0,343	14,7	21	0,7
	3	трапеция	0,2	1,06	0,343	17	21	0,81
			1	1,6	1			
	4	трапеция	0,2	1,06	0,343	14,7	21	0,7
			1	1,6	1			

, где D_1, D_2 - внутренний и внешний диаметр кольцевого канала соответственно, $\theta = D_1/D_2$ - параметр кривизны кольцевого канала.

Для проверки проводимых экспериментов первые исследования проведены на участке типа 1, гидравлическая характеристика которого представлена на рисунке 5. Согласно справочным данным [20], сопротивление исследуемого гладкого кольцевого канала будет превышать сопротивления гладкой трубы с таким же гидравлическим диаметром на 6 %.

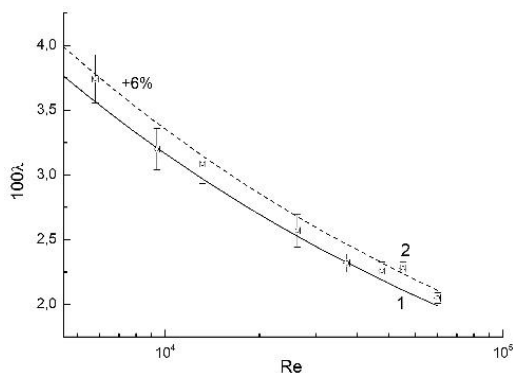


Рисунок 5. Гидравлическая характеристика гладкого кольцевого канала: 1 – расчётные значения по формуле Блаузиуса, 2 – экспериментальные данные.

В четвертой главе описана методика расчета коэффициента гидравлического сопротивления плоского канала с различной шероховатостью на стенках. Методика применима для кольцевых каналов с кривизной $\theta = D_2/D_1 \geq 0,8$.

В основу методики положена идея представления полного канала как совокупности двух невзаимодействующих плоских слоев толщиной y_1 и y_2 с различными законами сопротивления. Плоские слои эквивалентны плоским каналам шириной $2y_1$ и $2y_2$, соответственно, с одинаковыми условиями на стенках. Из-за различия условий на стенках линия нулевых касательных напряжений будет смещена относительно центра канала, как показано на рисунке 6.

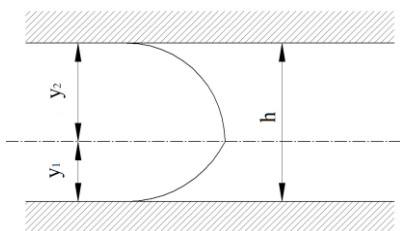


Рисунок 6. Схема распределения скорости в плоском канале со стенками различной шероховатости.

При заданных условиях на стенках известны коэффициенты гидравлических сопротивлений λ_1 и λ_2 слоев. В этом случае решение задачи имеет вид:

$$2\bar{\lambda} = \lambda_1 \frac{(1+n\beta^2)^3}{(1+n\beta^3)^2} \quad (5)$$

$$V_1 = \beta \frac{n+\beta^2}{n+\beta^3}, V_2 = \frac{n+\beta^2}{n+\beta^3}, Y_1 = \frac{\beta^2}{n+\beta^2}, Y_2 = \frac{n}{n+\beta^2},$$

где $\bar{\lambda}$ – коэффициент гидравлического сопротивления канала в целом, λ_1, λ_2 - коэффициент гидравлического сопротивления 1-ого и 2-ого слоя соответственно, $y_1 = Y_1 h, y_2 = Y_2 h$ - толщина 1-ого и 2-ого слоя соответственно, $u_1 = V_1 \bar{u}, u_2 = V_2 \bar{u}$ - средняя скорость 1-ого и 2-ого слоя соответственно, $\beta = \frac{1+0,884\sqrt{\lambda_2}}{1+0,884\sqrt{\lambda_1}}, n = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$.

Результаты сравнения расчетов по формуле (5) и проведенных экспериментов представлены на рисунке 7. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют в пользу работоспособности предлагаемой методики. Отклонения при расчете коэффициента гидравлического сопротивления связаны с тем, что расчёт сопротивления шероховатого канала производился по формулам для автомодельной области с использованием значения $\Delta_{\text{ЭКВ}}$ [19], наибольшие отклонения расчётов от экспериментов находятся в переходной области.

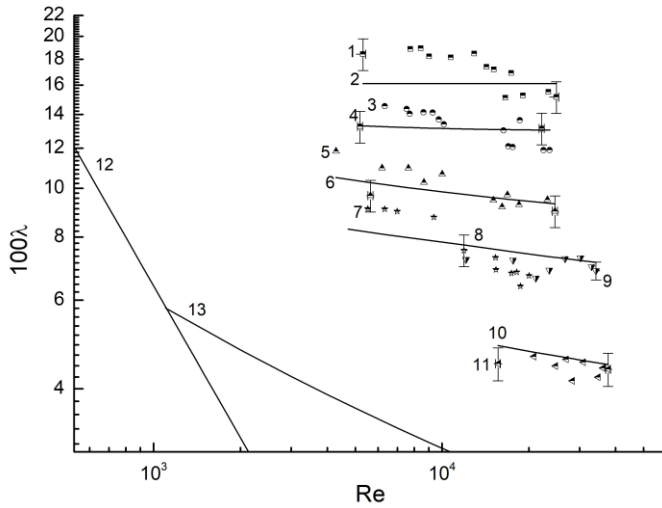


Рисунок 7 – Гидравлическая характеристика шероховатого кольцевого канала:

- 1 – экспериментальные данные участка 4.1;
- 3 – экспериментальные данные участка 4.3;
- 5 – экспериментальные значения участка 3.2;
- 7 – экспериментальные данные участка 2.1;
- 9 – экспериментальные данные участка 3.1;
- 11 – экспериментальные данные участка 2.4;
- 2-10 – расчет по формуле (5); 12 – ламинарный режим; 13 – турбулентный режим (McKeon).

Методика позволят решить обратную задачу. При заданном условии только на второй стенке известны λ_2 и $\bar{\lambda}$ из эксперимента, можно рассчитать λ_1 . Решение задачи имеет вид:

$$\lambda_1 = 2\bar{\lambda} \left(1 + \frac{3}{4} \frac{\alpha^2 k}{(1+k)^2} \right) - \lambda_2,$$

где $\alpha = 1,77(\sqrt{\lambda_2} - \sqrt{\lambda_1})$, $k = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$, $\beta = \left(\frac{1+0,884\sqrt{\lambda_1}}{1+0,884\sqrt{\lambda_2}} \right)^2$. По известному значению λ_1 рассчитывается значение эквивалентной песочной шероховатости $\Delta_{\text{экр.}}$. Полученные значения представлены в таблице 2.

Таблица 2. Эквивалентная песочная шероховатость

Форма выступа	Трапеция	Трапеция	Прямоугольник
S, мм	1,06	1,6	0,5
k, мм	0,2	1,0	0,240
$\Delta_{\text{экр.табл. [19], мм}}$	0,373	1,00	0,182
$\bar{\Delta}_{\text{экр.эксп., мм}}$	0,362	1,01	0,221
$\delta_1, \%$	3	1	21,4
$\delta_2, \%$	1,3	0,6	7

, где S – шаг выступов шероховатости, k – высота выступов шероховатости, δ_1 – отклонение экспериментальных значений песочной шероховатости $\bar{\Delta}_{\text{экр.эксп.}}$ от табличных

значений $\Delta_{\text{экв.табл.}}$, δ_2 - отклонение значений гидравлического сопротивления канала с экспериментальным значением $\bar{\Delta}_{\text{экв.эксп.}}$ от гидравлического сопротивления канала с табличным значением $\Delta_{\text{экв.табл.}}$.

Пятая глава посвящена новому обобщенному одномерному каналу – кольцевому слою. Он представляет собой твердую цилиндрическую стенку радиуса r_T и примыкающего к стенке слоя жидкости или газа толщиной h , на внешней поверхности которого, при $r = r_0$, отсутствует поток импульса и достигается максимум скорости. При движении жидкости вдоль оси канала скорость изменяется по одной координате – радиусу $u_x(r)$. Кольцевой слой именуется внешним, если координаты точек в потоке жидкости больше радиуса твердой стенки $r > r_T$, при этом $r_0 = r_T + h$, и внутренним, если стенки $r < r_T$, при этом $r_0 = r_T - h$. Оба типа кольцевых слоев проиллюстрированы на рисунке 8.



Рисунок 8 - Кольцевой слой: а – внешний; б – внутренний.

Кольцевой слой характеризуется величинами размерности длины r_T, h и одной безразмерной величиной $\alpha = \pm \frac{h}{r_T}$ - параметром кривизны слоя. Знак «+» соответствует внешнему кольцевому слою, знак «-» - внутреннему кольцевому слою.

Решена задача ламинарного движения жидкости в кольцевом слое. Основными результатами являются полученные соотношения (6) для определения коэффициента гидравлического сопротивления и (7) отношения максимальной скорости потока к средней в зависимости от кривизны слоя $R_0 = 1 + \alpha$.

$$\lambda = A/Re, \quad (6)$$

где $A = 64 + 32R_0^{1,44}$ при $R_0 \in [0; 5]$.

$$\frac{u_{max}}{\bar{u}} = \frac{(R_0^2 - 1) \left(R_0^2 \ln R_0 - \frac{1}{2}(R_0^2 - 1) \right)}{R_0^4 \ln R_0 - \frac{3}{4}R_0^4 + R_0^2 - 0,25} \quad (7)$$

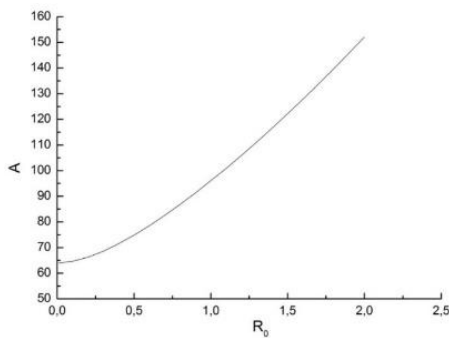


Рисунок 9 - График зависимости коэффициента A от кривизны кольцевого слоя $R_0 = 1 + \alpha$.

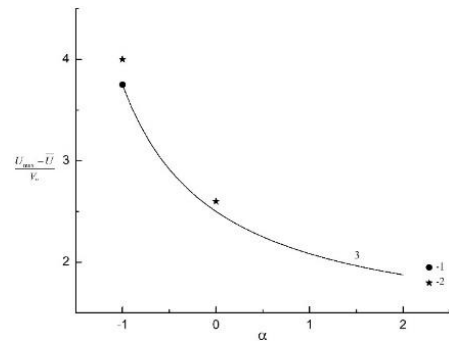


Рисунок 10 - График зависимости $\frac{U_{max} - \bar{U}}{V_*}$ в турбулентном потоке от параметра кривизны α : 1 – данные [21]; 2 – данные [22].

Решена задача турбулентного течения теплоносителя в кольцевом слое с гладкими стенками. Соотношение для определения отношения максимальной скорости потока к средней имеет вид (8)

$$\frac{U_{max} - \bar{U}}{V_*} = \frac{5}{4} + \frac{4}{2\alpha + 4} \quad (8)$$

а для определения коэффициента гидравлического сопротивления вид (9)

$$\frac{1}{\Lambda} = 2,5 \ln(Re \Lambda) + 5,5 - 2,5 \ln(4 + 2\alpha) - \frac{1,25(4 + \alpha)}{2 + \alpha}, \quad (9)$$

где $\Lambda = \sqrt{\lambda_{тр}/8}$, $\alpha \in [-1; +\infty)$. При $\alpha = -1$ кольцевой слой переходит в круглую трубу, сравнительный анализ значений коэффициентов гидравлического сопротивления круглой трубы, рассчитанных по формуле (9) и формуле Блаузиуса в диапазоне $Re \in [3 \cdot 10^3; 2 \cdot 10^5]$ показал отличие не более 4%, по формуле (9) и по формуле Прандтля не более 1%, по формуле (9) и формуле МсКеоп не более 4% в диапазоне $Re \in [3 \cdot 10^3; 10^7]$.

Формула (9) может быть применена к расчёту коэффициента гидравлического сопротивления пучков стержней. Эквивалентная ячейка выделяется твердой поверхностью стержня диаметром d и линией нулевых касательных напряжений. При не очень плотных упаковках эквивалентную ячейку можно заменить круглой, то есть получим кольцевой слой, при той же площади жидкости. На рисунках 11 и 12 представлены результаты сравнительного анализа коэффициента гидравлического сопротивления кольцевого слоя $\lambda_{кc}$ по формуле (9) со значениями по формулам для стержневой упаковки λ_{cy} , рекомендованных в справочнике Кириллова П. Л. [20].

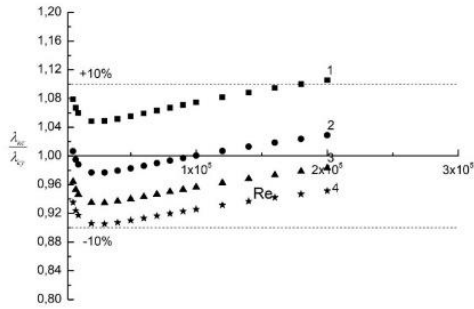


Рисунок 11 – График зависимости $\frac{\lambda_{кc}}{\lambda_{сy}}$ в

зависимости от числа Re для правильной треугольной упаковки стержней: 1 - $\frac{s}{d} = 1,1$; 2 -

$$\frac{s}{d} = 1,2; 3 - \frac{s}{d} = 1,3; \frac{s}{d} = 1,4.$$

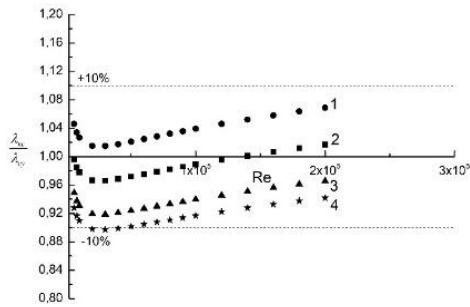


Рисунок 12 – График зависимости $\frac{\lambda_{кc}}{\lambda_{сy}}$ в

зависимости от числа Re для квадратной упаковки стержней: 1 - $\frac{s}{d} = 1,15$;

$$2 - \frac{s}{d} = 1,2; 3 - \frac{s}{d} = 1,3; \frac{s}{d} = 1,4.$$

В случае шероховатой стенки соотношение для определения коэффициента гидравлического сопротивления имеет вид (10)

$$\frac{1}{\Lambda} = 2,5 \ln \frac{h}{k} + \Phi - \frac{1,25(4+\alpha)}{2+\alpha}, \quad (10)$$

Для круглой трубы с песочной шероховатостью на стенках в режиме полного проявления шероховатости, когда $\alpha = -1$ и $\Phi = \Phi_{ш} = 8,48$, коэффициент гидравлического сопротивления по формуле (10) отличается от экспериментальных данных И.Никурадзе не более 1,5%.

В основе методики расчёта коэффициента гидравлического сопротивления кольцевого канала с различной шероховатостью на стенках лежит кольцевой слой. Линией нулевых касательных напряжений кольцевой канал разбивается на два невзаимодействующих кольцевых слоя: внешний и внутренний. Толщины каждого слоя h_1 и h_2 зависят от условий на стенке и параметра кривизны α_1 .

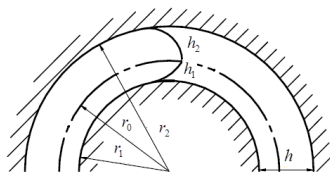


Рисунок 13 – Схема кольцевого канала

При заданных условиях на стенках и радиусах r_1 и r_2 кольцевого канала известны коэффициенты гидравлических сопротивлений λ_1 и λ_2 кольцевых слоев. В этом случае решение задачи имеет вид:

$$\bar{\lambda} = \frac{(\Lambda_1 + n^2 \Lambda_2)^3}{2(f_1 \Lambda_1 + f_2 \Lambda_2 n^3)^2}, \quad (11)$$

$$V_1 = \frac{\Lambda_1 + n^2 \Lambda_2}{f_1 \Lambda_1 + f_2 \Lambda_2 n^3}, V_2 = n V_1, Y_1 = \frac{\Lambda_1}{\Lambda_1 + n^2 \Lambda_2}, Y_2 = 1 - Y_1.$$

Рассчитанные значения по формуле (10) согласуются с данными из книги Петухова Б.С. [19], расхождение не превышает 1,5%, и подтверждают зависимость коэффициента гидравлического сопротивления гладкого кольцевого канала от двух параметров $\lambda = \lambda(Re; \theta)$. На рисунке 14 показана гидравлическая характеристика кольцевых каналов типа 4.

Значения параметра $\beta = \frac{r_0}{r_2}$, определяющего линию нулевых касательных напряжений в кольцевом канале, рассчитанные по (10) и по [17] отличаются для каналов типа 2 не более 2%.

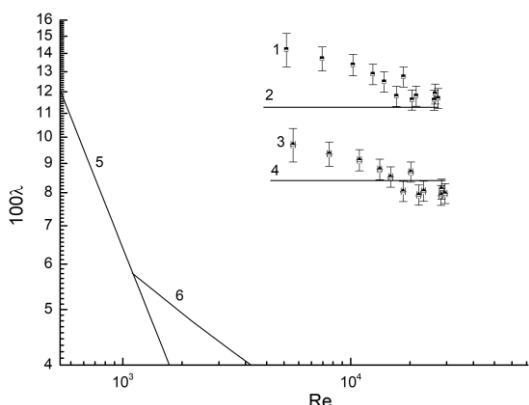


Рисунок 14 - Гидравлическая характеристика кольцевого канала с шероховатыми стенками:

- 1 – экспериментальные данные участка 4.4;
- 3 – экспериментальные данные участка 4.2;
- 2,4 – расчётные значения по (10);
- 5 – ламинарный режим; 6 – турбулентный режим (McKeon).

Методика позволят решить обратную задачу. При известном условии только на второй стенке известны λ_2 и $\bar{\lambda}$ из эксперимента, можно рассчитать λ_1 . По известному значению коэффициента гидравлического сопротивления кольцевого слоя с шероховатой стенкой λ_1 рассчитывается функция второй константы универсального профиля скорости $\Phi(\bar{\delta})$, в том числе в режиме полного проявления шероховатости числовое значение фактора формы $\Phi_{ш}$. Рассчитанный из экспериментов и с помощью значений $\Delta_{экв}$ фактор формы $\Phi_{ш}$ для исследованных шероховатостей представлен в таблице 3.

Полученные экспериментальные данные коэффициента гидравлического сопротивления и значения фактора формы $\Phi_{ш}$ свидетельствуют в пользу работоспособности предлагаемой методики. Отклонения при расчете коэффициента гидравлического сопротивления связаны с тем, что расчёт сопротивления шероховатого канала производился по формулам для автомодельной

области с использованием значения $\Delta_{\text{ЭКВ}}$ из литературы, существенные отклонения расчётов от экспериментов находятся в переходной области.

Таблица 3. Фактор формы шероховатости.

Форма выступа	$\frac{s}{k}$	$\Phi_{\text{ш1}}$	$\Phi_{\text{ш2}}$	$\Phi_{\text{ш3}}$
трапеция	5,3	6,7	6,98	6,8
трапеция	1,6	8,4	8,6	8,5
прямоугольник	2,08	7,2	6,8	7,2

, где $\Phi_{\text{ш1}}$ – значение фактора формы, полученные по методике; $\Phi_{\text{ш2}}$ – значение фактора формы, полученные по формуле (3), значение λ рассчитывалось с использованием значения $\Delta_{\text{ЭКВ}}$; $\Phi_{\text{ш3}}$ – значение фактора формы, полученные по формуле (3), значение λ рассчитывалось по методике [23].

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны основные положения новой полуэмпирической модели взаимодействия турбулентного потока с шероховатой стенкой. Введен дополнительный параметр - фактор формы шероховатости $\Phi_{\text{ш}}$, характеризующий уровень скорости на границе шероховатой области в единицах динамической скорости. Числовое значение $\Phi_{\text{ш}}$ зависит геометрии выступов, определяемых ГОСТ. Модель апробирована на трубах с песочной шероховатостью на стенках, полученные значения $\lambda\left(\frac{k}{d}; Re; \Phi_{\text{ш}}\right)$ отличаются от экспериментальных данных И.Никурадзе не более 5% во всех областях турбулентного движения теплоносителя.

2. Разработана новая методика расчета коэффициента гидравлического сопротивления плоского канала с различной шероховатостью на стенках при турбулентном течении теплоносителя. Отличие расчетных значений сопротивления по методике $\lambda_{\text{расч}}$ от экспериментальных данных $\lambda_{\text{эксп}}$ в автомоделной области сопротивления не превышает 9%, погрешность определения $\lambda_{\text{эксп}}$ составляет 8 %. Методика позволяет определить значение эквивалентной песочной шероховатости $\Delta_{\text{ЭКВ}}$ для заданной искусственной или естественной. Для исследованных геометрий выступов шероховатостей отклонение расчетных значений $\Delta_{\text{ЭКВ}}$ от данных [19] не превышает 22%, при этом отклонение по коэффициенту гидравлического сопротивления λ не превышает 7 %. Указанные значения подтверждают работоспособность методики.

3. Введено понятие нового обобщенного канала – кольцевого слоя. Получено соотношение для расчета коэффициента гидравлического сопротивления в кольцевом слое, обобщающее случаи плоского канала, круглой трубы, кольцевого канала и эквивалентной ячейки упаковки стержней с произвольной шероховатостью на стенках. В случае течения однофазного теплоносителя в круглой гладкой трубе при $Re \in [3 \cdot 10^3; 10^7]$ значения λ по новому соотношению отличаются от λ , рассчитанному по известным соотношениям из справочников, не более 4%. В случае течения в трубе с песочной шероховатостью на стенке в автомодельной области сопротивлений – не более 1,5%. Коэффициент сопротивления λ эквивалентной ячейки пучков гладких стержней обобщается с отклонением $\pm 10\%$ от значений λ , полученных по формулам из справочника [20], для относительных шагов решетки $\frac{s}{d} = 1,1 \div 1,4$.

4. На основании кольцевого слоя разработана методика расчета коэффициента гидравлического сопротивления кольцевого канала с различной шероховатостью на стенках с учётом его кривизны при турбулентном течении теплоносителя. Работоспособность методики подтверждена сравнением $\lambda_{\text{расч}}$ по методике с $\lambda_{\text{эксп}}$, отклонение в автомодельной области сопротивлений не превышает 8%. По методике для исследованных геометрий выступов шероховатостей определены значения фактора формы $\Phi_{\text{ш}}$, которые согласуются с рассчитанными значениями $\Phi_{\text{ш}}$ по формулам других авторов, применимыми только для автомодельной области. Таким образом, с помощью предлагаемой методики возможно получить зависимости $\Phi_{\text{ш}} = \Phi_{\text{ш}}\left(\frac{k}{s}, \Pi\right)$, $\Phi = \Phi(\delta, \Phi_{\text{ш}})$ и восстановить гидравлическую характеристику $\lambda = \lambda\left(\frac{k}{d}; Re; \Phi_{\text{ш}}\right)$ канала с произвольной шероховатостью на стенке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Трофимов М.А., Глоба Р.Б. Зависимость шероховатости внутренней поверхности трубопроводов ядерных реакторов от срока их эксплуатации // Известия вузов. Ядерная энергетика. №3. 2019. С. 88-95.
- [2]. Шваров В.А. Ультразвуковая очистка топливных кассет ВВЭР на примере энкргоблоков №3 и №4 Нововоронежской АЭС: дис.кан.тех. наук.-М:2015; 249 с.
- [3]. Олимпиев В.В. Теплогидравлический расчет обтекания шероховатых твэлов, эффективность их применения в реакторе ВВЭР-1000 // Теплоэнергетика. 1992. № 3. С. 48.
- [4]. Олимпиев В.В. Эффективность интенсификации теплообмена посредством шероховатости твэлов в реакторе ВВЭР - 1000 // Теплоэнергетика. 1993. № 3. с. 35.
- [5]. M. Dalle Donne, L. Mayer. Turbulent convective heat transfer from rough surface with two-dimensional rectangular ribs // Int. J. Heat and mass transfer. V.20. №6-A. P. 583-620.
- [6]. Леонтьев А.И., Олимпиев В.В. Влияние интенсификаторов теплообмена на теплогидравлические свойства каналов // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 4. №6. С. 925–953.

- [7]. Попов И.А., Гортышев Ю.Ф., Олимпиев В.В. Промышленное применение интенсификаторов теплообмена – современное состояние проблемы // Теплоэнергетика. 2012. № 1. С. 3–14
- [8]. Тарасевич С.Э., Злобин А.В., Яковлев А.Б. Гидродинамика и теплообмен при движении однофазной жидкости в трубах с искусственной шероховатостью стенок // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 6. С. 938–952.
- [9]. Петухов Б. С. Современное состояние и перспективы развития теории теплообмена // Теплообмен-ВН. Проблемные доклады VII всесоюзной конференции по теплообмену. АН БССР, ИТМО. Ч. 1. Минск, 1985.
- [10]. Сольберг Т. Численное решение задачи обтекания лежащего на плоской поверхности цилиндра с использованием /К-Е-модели турбулентности // Современное машиностроение. 1990. № 6. С. 75.
- [11]. Кутателадзе, С.С. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое / Под. ред. Кутателадзе С.С. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1964. - 207 с.
- [12]. Олимпиев В.В. Расчетное и опытное моделирование теплоотдачи и гидросопротивления дискретно шероховатых каналов теплообменного оборудования. Дис. докт. техн. наук. Казань: Казанск. филиал МЭИ. 1995. С. 475.
- [13]. Олимпиев В.В. Расчет теплообмена и гидросопротивления турбулентного потока в дискретно шероховатых каналах // Изв. вузов. Авиационная техника. 1991. № 4. С. 69.
- [14]. Олимпиев В.В., Мирзоев Б.Г. Простая модель теплообмена и трения в каналах со спиральными пристенными завихрителями потока // Изв. вузов. Авиационная техника. 2012. №3.
- [15]. Хан Дж.К. Характеристики теплообмена и трения в прямоугольных каналах с турбулизирующими ребрами // Современное машиностроение, А.1989. № 2. С. 94.
- [16]. Nikuradse I. Stromungsgesetze in rauhen Rohren // Forschungs-Heft 361, 1933. P. 1—22.
- [17]. Maubach K. Rough annulus pressure drops. Interpretation of experiments and recalculation for square ribs // Int. J. Heat and mass transfer 15. 1972. 2489-2498.
- [18]. Warburton C., M.A. Pirie. An improved method for analyzing heat transfer and pressure drop tests on roughened rods in smooth channels // CEGB RD/B/N 2621. Berkley Nuclear Laboratories.1973.
- [19]. Петухов, Б.С. Теплообмен в ядерных энергетических установках/ Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалёв. – М.: Энергоатомиздат, 1986 - с. 224
- [20]. Кириллов, П. Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П. Л. Кириллов, Ю. С. Юрьев, В. П. Бобков; ред. П. Л. Кириллов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1990 - с. 360.
- [21]. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль. – М.: Стройиздат, 1975.
- [22]. Высоцкий, Л. И. К расчёту распределения осредненных скоростей в круглых трубах и плоских каналах // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. № 4(08). 2012. С.125-138.
- [23]. Кадер Б.А. Тепло – и массоперенос от стенок, покрытых двумерной шероховатостью, при больших числах Рейнольдса и Пекле // Теоретические основы химических технологий. Т. XIII. №5. 1979. С. 663-675.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

1. Hydraulic resistance of an annular channel with a rectangular roughness on the wall / Medgedem S., Korsun A.S., Fedoseev V.N., Pisarevskii M.I. and Pisarevskaya Y.N. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 1689 (2020).

2. Evaluation of wall sand roughness influence of friction in boundary layer/ Korsun A.S., Fedoseev V.N., Pisarevsky M.I. and Balberkina Y.N. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1133 (2018).

3. Hydraulic resistance of plane channels and annulus with different roughness on opposite walls / Korsun A.S., Kutsenko K.V., Pisarevsky M.I., Fedoseev V.N., Balberkina Y. N. // Thermal Engineering, 2017, vol. 64, pp. 234–236.

4. Determining the Equivalent Sand Roughness of a Surface by Measuring the Hydraulic Resistance of an Annular Channel / Korsun A.S., Pisarevsky M.I., Fedoseev V.N., M.I.Delov. // Power Technology and Engineering, 2017, vol. 51, №2, pp. 151–155.

5. Determination of hydraulic resistance of rough annular channels by resistance of rough pipes / Korsun A.S., Fedoseev V.N., Pisarevsky M.I., Kreps M.V. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017).

6. Velocity distribution in a turbulent flow near a rough wall / Korsun A.S., Fedoseev V.N., Pisarevsky M.I., Kreps M.V. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017).

7. Расчёт гидравлического сопротивления узкого кольцевого канала с различной шероховатостью противоположных стенок в приближении плоской щели / Корсун А.С., Писаревский М. И., Федосеев В. Н., Балберкина Ю.Н. // Ядерная физика и инжиниринг, 2016, том 7, № 2, с. 100–105.