

На правах рукописи

ГИНИЯТУЛЛИН АРТУР АЙРАТОВИЧ

**ТЕПЛООТДАЧА И ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРУБ СО
ВСТАВКАМИ В ВИДЕ ОРЕБРЕННЫХ СКРУЧЕННЫХ ЛЕНТ ПРИ
ОДНОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЯХ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2014

Работа выполнена на кафедре теплотехники и энергетического машиностроения Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н.Туполева

Научные руководители: доктор технических наук, профессор
Тарасевич Станислав Эдуардович

Официальные оппоненты:

Ведущая организация: Научно-исследовательский
университет - МЭИ

Защита диссертации состоится «__» _____ 20__ года в 10.00 на заседании диссертационного совета Д.212.079.02 в Казанском национальном исследовательском техническом университете им. А.Н.Туполева по адресу: 420111, г.Казань, ул.К.Маркса, 10 (зал заседаний Ученого совета).

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н.Туполева.

Электронный вариант автореферата размещен на сайте Казанского государственного технического университета (www.kai.ru).

Автореферат разослан «__» ____ 20 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



А.Г.Каримова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Интенсификация тепломассообменных процессов имеет большое значение для достижения прогресса в совершенствовании современного и создании нового энергетического и теплообменного оборудования. Проблемы снижения весогабаритных характеристик теплообменного оборудования и увеличения теплогидравлической эффективности могут успешно решаться при помощи использования в теплообменных аппаратах интенсификаторов теплообмена.

Среди многообразия способов интенсификации теплообмена закрутка потоков рабочих сред является одним из наиболее простых и распространенных способов и широко используется в энергонапряженных каналах ядерно-энергетических установок, теплообменников, аппаратов авиационной и ракетно-космической техники, химической промышленности и других технических устройств. Это связано с тем, что применение закрученных потоков приводит не только к усилению тепло- и массообмена, но и выравниванию температурных неравномерностей, стабилизации течения и процессов горения, используется для защиты стенок каналов, обеспечивает эффективное и экологически чистое сжигание топлива. По современной классификации методов интенсификации теплообмена закрутка потока в каналах, создаваемая с помощью закручивающих устройств, относится к пассивным методам интенсификации, т.е. не требует дополнительного подвода энергии извне. Самое эффективное и широко используемое устройство для закрутки потока в трубах – вставки в виде скрученной ленты.

Цель работы: на основе экспериментального и численного исследования получение зависимостей и выработка рекомендаций и оптимальных методов расчета теплогидравлических характеристик в трубах со вставками в виде оребренных скрученных лент при одно- и двухфазных течениях.

Конкретными задачами работы являлись:

- создание автоматизированного экспериментального стенда для исследования теплообмена и гидродинамики одно- и двухфазных течений в различных каналах с рабочими параметрами обеспечивающими подачу холодного и догретого до температуры насыщения теплоносителя;
- на основе экспериментального исследования изучить влияние геометрических характеристик ребер на теплообмен и гидродинамику потоков в трубах со вставками в виде оребренных скрученных лент
- на основе экспериментального исследования получить зависимости для расчета теплоотдачи и гидравлического сопротивления труб со вставками в виде оребренных скрученных лент имеющими различные геометрические характеристики
- на основе численного моделирования изучить процесс затухания возмущения, генерируемого одиночным ребром, установленным на поверхность скрученной ленты

- выработать методику численного моделирования для расчета теплоотдачи и гидравлического сопротивления труб с гладкими и оребренными скрученными лентами.

- сопоставить результаты численного моделирования по теплоотдаче и гидросопротивлению с имеющимися литературными зависимостями

Научная новизна:

1. Получены обобщающие зависимости для расчета теплоотдачи и гидравлического сопротивления труб со вставками в виде оребренных скрученных лент при турбулентном режиме течения в широком диапазоне режимных и конструктивных параметров.

2. Даны рекомендации по выбору оптимальных параметров оребрения

3. Выработана методика численного моделирования течения и теплообмена в трубах со вставками в виде скрученных лент в условиях однофазной вынужденной конвекции.

4. Изучен процесс затухания возмущения создаваемого одиночным ребром в трубе со вставкой в виде скрученной ленты при разных относительных шагах закрутки и скоростях течения.

5. Проведено численное моделирование поверхностного кипения в трубе со вставкой в виде скрученной лентой.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждаются выполнением ряда тестовых опытов и хорошим согласованием их результатов с расчетными зависимостями других исследователей, использованием современных компьютерных аппаратных и программных средств для обработки данных, соответствием полученных результатов физическим представлениям о процессах переноса в данном классе технических способов повышения тепловой эффективности теплообменного оборудования.

Практическая ценность. Практическое использование результатов работы позволяет:

- расширить фундаментальные знания о процессах теплообмена и гидродинамики в трубах со вставками в виде скрученных лент имеющих альтернативную конструкцию;

- проводить тепловые и гидродинамические расчеты теплообменного оборудования с использованием преимуществ непрерывной закрутки потока;

- осуществлять сравнительный анализ различных теплообменных аппаратов и испарителей с непрерывной закруткой потока.

Материалы работы могут быть использованы в учебном процессе и на предприятиях, занимающихся проектированием и созданием теплообменных аппаратов.

Созданный экспериментальный стенд используется для проведения лабораторных работ в учебном процессе и для выполнения научных исследований по другим тематикам.

Основные результаты работы вошли в научно–технические отчеты по проекту РФФИ 09-08-00224-а «Экспериментальное исследование и численный расчет теплообмена и гидродинамики в каналах с микро и макрошероховатыми поверхностями при одно- и двухфазных течениях»; проекту № 2.1.2/12279 аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)» по теме «Тепломассообмен и гидродинамика в каналах с шероховатыми поверхностями и закруткой потока»; ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по проекту «Разработка ресурсосберегающих технологий использования криогенных топлив» государственный контракт № П2467 от 9 ноября 2009 г.; проекту РФФИ 12-08-33032 мол_а_вед «Разработка научно-технических решений по интенсификации теплоотдачи при свободной и вынужденной конвекции одно- и двухфазных теплоносителей в компактных системах охлаждения»; проекту РФФИ 13-08-0469 А «Экспериментальное и численное исследование теплообмена и гидродинамики в каналах с различными закручивающими вставками при одно- и двухфазных течениях»; проекту РФФИ 14-08-31178 мол_а «Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик двухфазных течений при кипении хладагентов R134a и R507a в каналах различной формы»; проекту №14.Z50.31.0003 от «04» марта 2014 г. «Создание многопрофильной, комплексной лаборатории моделирования физико-технических процессов при решении сопряженных задач аэромеханики, теплофизики, акустики и вибростойкости, вентиляции и микроклимата, экологии и мониторинга эксплуатации грузовых автомобилей и их агрегатов».

Апробация работы. Полученные основные результаты докладывались и были одобрены на Международной молодёжной научной конференции «XVII Туполевские чтения» (г. Казань, 2009), «XVIII Туполевские чтения» (г. Казань, 2010), «XX Туполевские чтения» (г. Казань, 2012), «XXI Туполевские чтения» (г. Казань, 2013), на Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» (г. Казань, 2011), на VIII школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН Алемасова В.Е. (Казань 2012 г.), на VI международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ» (г. Казань, 2011), на международной научной школе «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических технологиях» (Москва 2011 г.), на шестой международной конференции «Baltic Heat Transfer Conference» (г. Тампере, Финляндия 2011 г.), на международном симпозиуме американского общества инженеров механиков «Verification&Validation» (г. Лас-Вегас, США 2012 г.), на международной конференции американского общества инженеров механиков «Fluids Engineering Summer Meeting FEDSM 2013» (г. Инклайн Вилледж, США 2013 г.)

на шестой «Российской Национальной Конференции по Теплообмену РНКТ-6» (г. Москва, Россия 2014 г.).

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ (2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 докладов в сборниках трудов конференций и 8 тезисов доклада).

Личный вклад автора: автором создан экспериментальный стенд в соответствии с целями исследования; проведены эксперименты, выполнены обработка, анализ и обобщение полученных результатов. Проведено численное исследование течения и теплообмена в трубах с различными скрученными лентами средствами коммерческого гидродинамического пакета ANSYS FLUENT 13, выполнена обработка и анализ результатов.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка использованных источников, насчитывающего 142 наименования. Объем диссертации составляет 161 страницу машинописного текста, включая 78 рисунков и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, ее цель, формулируются основные защищаемые положения, научная новизна результатов.

В первой главе проанализировано современное состояние рассматриваемой проблем и сформулированы задачи настоящего исследования.

Проведенный анализ литературных источников показал, что имеется значительное количество работ по исследованию теплообмена и гидродинамики в каналах с непрерывной по длине закруткой и, в частности, в трубах со вставленной скрученной лентой при одно- и двухфазных течениях (А.Е. Берглес, Р.Ф. Лопина, Р. Кох, Е. Смитберг и Ф. Лэндис, У. Гэмбил и Р. Банди, В.К. Щукин, В.К. Ермолин, М.Х. Ибрагимов, Е.В. Номофилов, В.И. Субботин и др.). Этот вопрос достаточно хорошо проработан в литературе. Было проведено большое количество экспериментальных исследований, получены обобщающие зависимости по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению, выявлены механизмы, отвечающие за интенсификацию теплообмена и рост гидравлического сопротивления. Следует отметить, что порой наблюдается значительное расхождение в данных различных авторов, поэтому большинство указанных соотношений пригодно лишь для ограниченного диапазона режимных и конструктивных параметров, при которых они были получены. Тогда как с точки зрения практики необходимы более общие зависимости, которые могут быть использованы при проектировании теплообменного и энергетического оборудования, работающего с различными жидкостями, геометриями скрученных лент и режимных параметров. В настоящее время в литературе помимо исследований влияния гладких скру-

ченных лент на теплогидравлические характеристики потока активно изучается влияние модифицированных скрученных лент с геометриями, часто значительно отличающихся от классической. Одной из предпосылок использования геометрически модифицированных скрученных лент является желание уменьшить гидравлические потери при сохранении уровня интенсификации теплообмена. В настоящее время для расширения возможностей использования геометрически модифицированных скрученных лент многими авторами проводятся исследования с геометриями лент, направленными больше на дополнительную интенсификацию теплообмена, чем на снижение гидравлических потерь. На основании обзора литературы работы можно сделать вывод, что наиболее перспективными геометриями с точки зрения интенсификации теплообмена и увеличения теплогидравлической эффективности являются скрученные ленты с небольшими разрывами на поверхности ленты (зазубрины, отогнутые сегменты на периферии, рассеченная лента).

В работах Тарасевича, Яковлева, Шишкина изучалось влияние скрученных лент имеющих ребра на поверхности, установленных под углом к оси, на гидродинамику и теплообмен одно- и двухфазных течений. При течении двухфазного теплоносителя ребра смещают жидкую фазу к периферии, увеличивая тем самым смоченный периметр при больших значениях паросодержания и продляя бескризисные режимы теплообмена. Авторы также отмечают, что оребренные скрученные ленты являются эффективным средством интенсификации теплообмена при течении однофазного теплоносителя. Наибольшей эффективностью, по их мнению, обладают ребра, установленные против направления скручивания ленты. Научным коллективом кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения» КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева получен патент на изобретение устройства для интенсификации теплообмена, представляющего собой скрученную ленту, с установленными на поверхность ребрами под углом к оси.

Во второй главе изложено описание созданной экспериментальной установки, конструкции рабочего участка, приводятся методики проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных, произведена оценка погрешности экспериментальных исследований, проведены тестовые опыты по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению для проверки работоспособности экспериментальной установки и подтверждения достоверности получаемых результатов.

Схема стенда представлена на рис.1. Гидравлическая схема стенда выполнена в виде разомкнутого контура с принудительной системой подачи теплоносителя из расходного бака-нагревателя в рабочий участок. Все проточные части стенда выполнены из нержавеющей стали во избежание коррозии, так как в качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода. На установке реализована система автоматического управления параметрами эксперимента. Шкаф управления выполнен в виде отдельно стоящего металлического шкафа, в котором сосредоточены системы автоматизации, индикации, управления и защиты всей экспериментальной установки. Тепловой по-

ток на стенках исследуемого канала обеспечивается омическим (электроконтактным) нагревом переменным током от сухого трансформатора марки «ТСС-160/0,5 УЗА». Напряжение на вторичной обмотке (НН) понижающего трансформатора плавно изменяется в диапазоне 2-24 В, что обеспечивает плавную регулировку мощности выделяемой на участке от 0,5 до 40 кВт.

Эксперименты, проводимые на описанном выше стенде, позволяют охватить следующий диапазон изменения рабочих параметров: избыточное давление в канале $P=10$ атм.; массовый расход теплоносителя G до 6,5 кг/с; плотность теплового потока на участке q до 3 МВт/м².

Экспериментальный участок для исследования теплоотдачи и гидросопротивления труб со вставками в виде скрученных лент, представляет собой канал с осевыми входом и выходом. Толщина трубы составляет 1 мм при ее внутреннем диаметре 10 мм, длина трубы $L=460$ мм. Канал размещался вертикально с подъемным течением теплоносителя. Наружная сторона экспериментального участка покрыта двумя слоями теплоизоляции для обеспечения минимального тепловыделения. Между фланцами экспериментального участка и фланцами отводящих/подводящих патрубков устанавливается цельно выточенная прокладка из фторопласта толщиной 7 мм, которая обеспечивает электрическую и, в определенной мере, тепловую изоляцию рабочего участка от металлического контура всей экспериментальной установки. Участки стабилизации перед и после рабочего участка имели длину $80d$ и $50d$ соответственно. К подводящим и отводящим патрубкам приварены штуцеры с гайкой для присоединения датчиков давления.

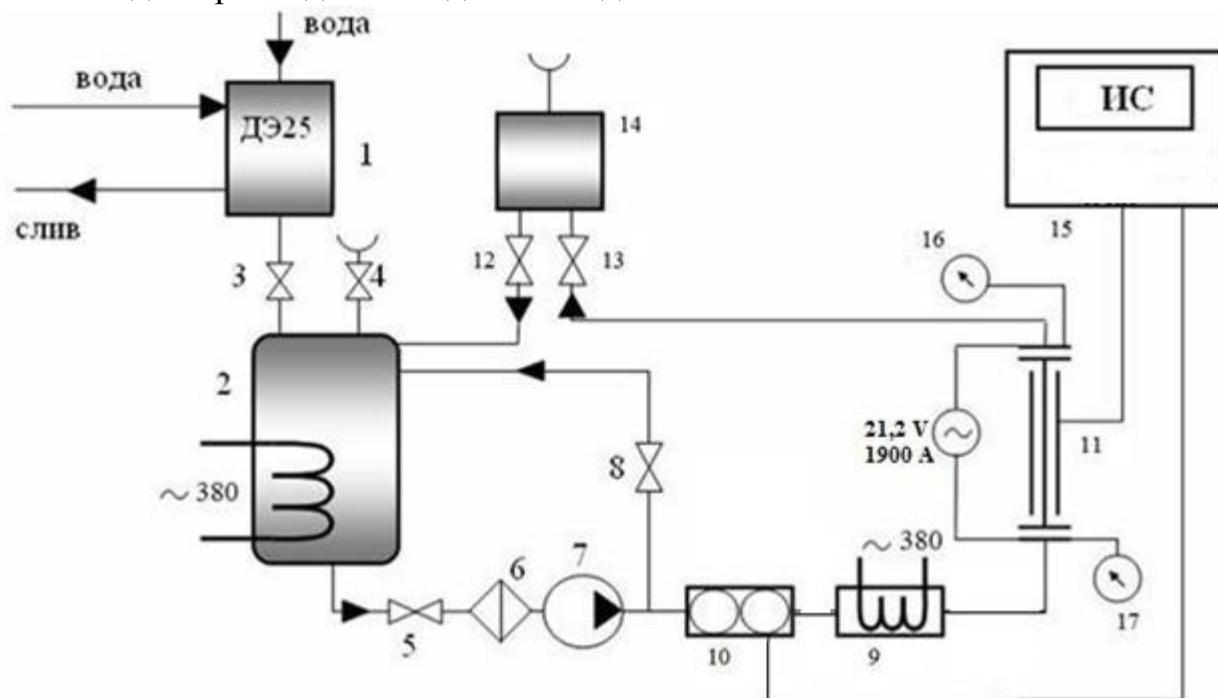


Рис.1. Гидравлическая схема экспериментального стенда: 1 – дистиллятор, 2 – бак нагреватель, 6 – фильтр, 7 – насос, 9 – проточный нагреватель, 10 – расходомеры, 11 – экспериментальный участок, 14 – бак накопитель, 15 – измерительная система, 3,4,5,8,12,13 – вентили, 16,17 – датчики давления

Экспериментальный участок препарирован термопарами в семи сечениях по 2 штуки в каждом с наружной стороны канала, по одной термопаре установлено на входе и выходе теплоносителя. Корольки термопар изготавливались из проволоки хромель-копель диаметром 0,2 мм. Термопары на входе и выходе теплоносителя заделаны в болты и закручиваются в подводящий и отводящий патрубки. Погружная часть входных и выходных термопар выполнена таким образом, чтобы оказывать минимальное возмущающее влияние на поток. Температуры теплоотдающих поверхностей определялись с учетом термического сопротивления стенки при внутреннем тепловыделении.

Для организации закрутки потока в экспериментальный участок устанавливались скрученные ленты толщиной 0,9 мм и шириной равной внутреннему диаметру трубы. Лента покрыта высокотемпературным лаком для обеспечения электрической изоляции со стенкой канала. Относительные шаги закрутки ленты при повороте на 180° составляли $s/d=2,5; 3; 4; 6$. В работе исследовались гладкие ленты и ленты, имеющие ребра на поверхности. В поперечном сечении ребра представляют собой окружность, они изготавливались из проволоки различного диаметра. Ребра закреплялись на ленте специальным клеящим составом на основе полиэфирных смол, после высыхания которого, ленты окрашивались порошковой краской с последующей сушкой в сушильной камере. Ребра устанавливались против направления скручивания ленты, высота ребер была $h=0,5; 1; 1,5$ мм, шаг установки ребер $t=40; 80; 120$ мм, угол установки ребер относительно нормали к касательной в точке соприкосновения ребра и торцевой кромки скрученной ленты $\alpha = 40; 45; 50^\circ$. Схематическое изображение данных лент показано на Рис. 2

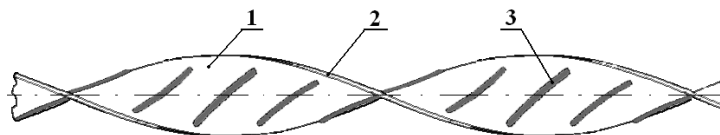


Рис. 2 Скрученная лента с ребрами на поверхности. 1 – скрученная лента; 2- торцевая кромка; 3-ребро

Результаты проведенных тестовых экспериментов по теплоотдаче и гидросопротивлению при турбулентном режиме течения в прямых трубах, и в трубах со вставленной скрученной лентой удовлетворительно согласуются с расчетами по известным зависимостям и подтверждают достоверность получаемых результатов на созданном стенде.

В третьей главе описана методика и математическая модель проведенного численного моделирования, а также представлены результаты численного исследования течения и теплообмена труб со вставками виде скрученных лент.

Моделирование течения и теплообмена в трубах со вставками в виде скрученных лент было выполнено средствами коммерческого гидродинамического кода Ansys Fluent 13.0 в трехмерной постановке. Вычислительная станция была построена на базе серверного 24 ядерного компьютера на основе двух процессоров Intel Xeon 5650. Для моделирования однофазных тур-

булентных несжимаемых течений использовались усредненные уравнения Рейнольдса.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) \quad (1)$$

с замыканием по гипотезе Буссинеска

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (2)$$

Для вычисления турбулентной вязкости использовались две двухпараметрические модели турбулентности: RNG k - ε модель турбулентности с пристеночными функциями и низкорейнольдсовая k - w SST модель Ментера. Модели турбулентности k - ε лучше описывают свойства свободных сдвиговых течений, а модели типа k - w имеют преимущество при моделировании пристеночных течений.

Для дискретизации исходных уравнений использовался неявный метод конечных объемов. Пространственная дискретизация задачи осуществляется путем разбиения расчетной области на небольшие соприкасающиеся объемы, для каждого из которых записывается балансовое соотношение:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} d\Omega + \sum_k \int_{S_k} \vec{n} \cdot \vec{q} ds = \int_{\Omega} S d\Omega, \quad \vec{q} = \rho \vec{V} \phi - \alpha \nabla \phi \quad (3)$$

Дискретный аналог балансовых соотношений получается суммированием по всем граням выделенного объема. Линеаризованные дискретные уравнения образуют систему линейных уравнений, решение которой дает обновленные значения переменных. Внутри каждого контрольного объема находится одна точка привязки искомого сеточного решения. Вычисление потоков на гранях расчетной ячейки осуществлялось таким образом, что результирующая схема имеет прямоточную аппроксимацию второго порядка для конвективных членов и центрально-разностную схему второго порядка для вязких членов.

Были проведены численные исследования теплоотдачи и гидросопротивления трубах со вставками в виде гладких скрученных лент при стабилизированном течении воды с теплофизическими свойствами, зависящими от температуры. Геометрические параметры расчетной области были аналогичны тем, при которых проводилось экспериментальное исследование. Полученные результаты были сравнены с экспериментальными зависимостями, представленными в литературе. Результаты по теплоотдаче были сравнены с зависимостью Манглика-Берглеса, как наиболее общепризнанной в настоя-

щее время в мировой литературе по скрученным лентам. Результаты по гидросопротивлению были сравнены с двумя зависимостями: Манглика-Берглеса и Ибрагимова.

В исследованиях теплоотдачи для труб с лентами с большим относительным шагом закрутки $s/d=6$ наблюдается хорошее согласование результатов численного моделирования, полученных в подходе с низкорейнольдсовой моделью турбулентности $k-\omega$ SST, с расчетной зависимостью Манглика-Берглеса особенно в области малых значений числа Рейнольдса (Рис.3). Данные полученные в расчетах с $k-\varepsilon$ моделью турбулентности имеют более существенное расхождение, достигающее 17% (Рис.2).

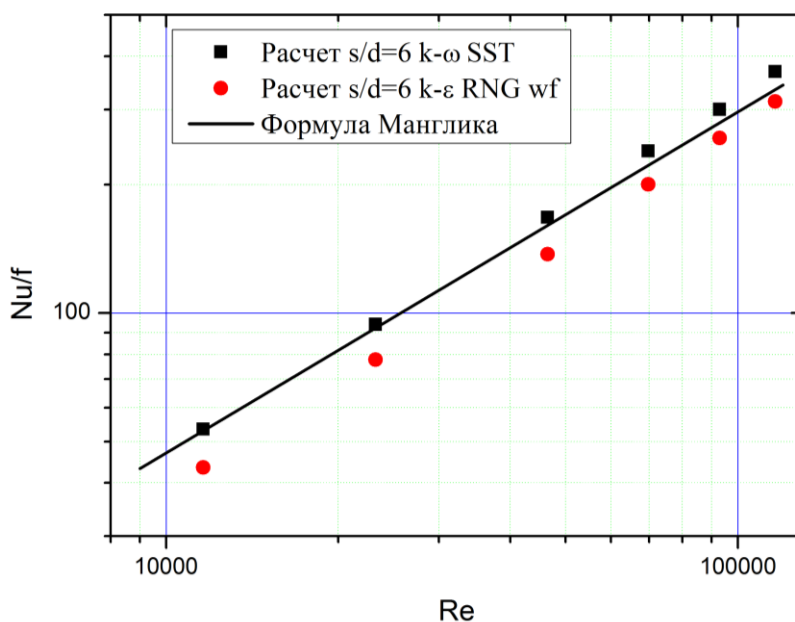


Рис. 3 Зависимость коэффициента теплоотдачи трубы со скрученной лентой $s/d=6$ от числа Рейнольдса Re : точки – расчетные данные, линия - зависимость Манглика-Берглеса

В исследовании гидросопротивления для труб с лентами с большим относительным шагом закрутки $s/d=6$ (Рис. наблюдается хорошее согласование результатов численного моделирования, с максимальной относительной погрешностью $\pm 7\%$, полученных в подходе с низкорейнольдсовой моделью турбулентности $k-\omega$ SST, с расчетной зависимостью Ибрагимова во всей области исследованных чисел Рейнольдса.

Было изучен процесс затухания возмущения за одиночным ребром средствами компьютерного моделирования. На Рис. представлены профили осевой скорости в сечении секции трубы, образованной вставкой в виде скрученной ленты и поверхностью трубы при различных скоростях на входе и расстояниях вниз по потоку. Как видно из представленных рисунков, наличие ребра на поверхности скрученной ленты приводит к существенному перестроению профиля осевой скорости. Максимальное возмущающее действие ребра сосредоточено непосредственно в местах его взаимодействия с потоком, однако оно распространяется и на некоторое расстояние вниз по потоку.

ку. Иными словами, перестроение профиля скорости к первоначальному происходит на некотором расстоянии от ребра. Это расстояние, как стало известно, зависит от относительного шага закрутки ленты и числа Рейнольдса потока.

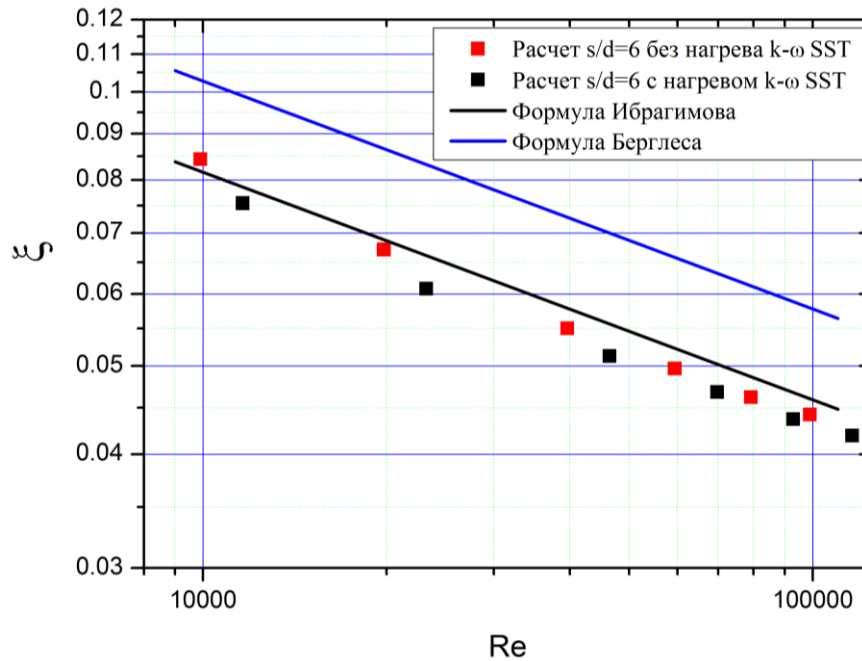


Рис. 4 Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ трубы со скрученной лентой $s/d=6$ от числа Рейнольдса Re : точки – расчетные данные, линии - зависимости М.Х. Ибрагимова и Манглика-Берглеса

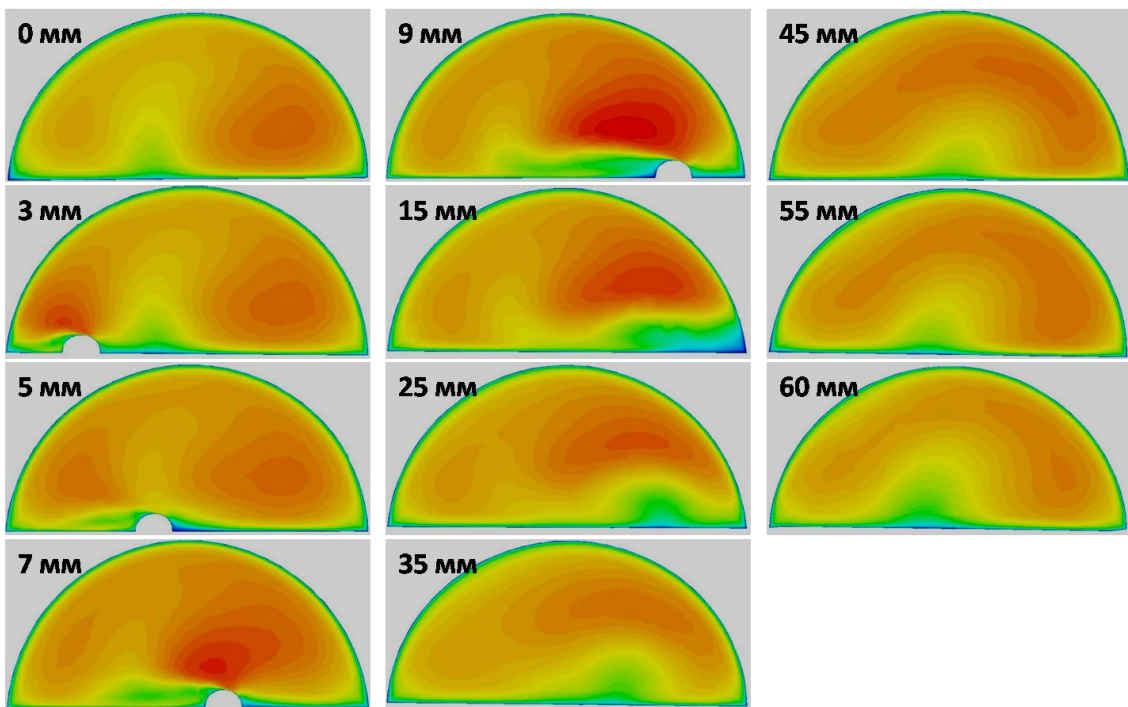


Рис. 5 Профили осевой скорости в сечении секции трубы, образованной вставкой в виде скрученной ленты и поверхностью трубы при различных расстояниях вниз по потоку и скорости 4 м/с

На Рис. представлен график зависимости относительного расстояния восстановления t/d профиля осевой скорости от числа Рейнольдса Re для трех относительных шагов закрутки ленты $s/d=4$; $s/d=3$ и $s/d=\infty$ и одиночного ребра имеющего высоту $h=0,5$ мм и угол установки $\alpha=45^\circ$. На основе анализа графика можно сделать вывод, что с увеличением числа Рейнольдса Re увеличивается относительная длина восстановления для всех относительных шагов закрутки ленты. То есть при увеличении скорости потока, возмущения, созданные установленным ребром, проникают дальше вниз по потоку. То есть относительная длина восстановления профиля имеет следующую функциональную зависимость:

$$\frac{t}{d} = f(Re, \frac{s}{d}) \quad (4)$$

Начиная с некоторого значения числа Рейнольдса происходит перегиб графика и дальнейшее увеличение скорости потока начинает слабо влиять на относительную длину стабилизации. Число Рейнольдса, при котором проявляется данный эффект слабо зависит от интенсивности закрутки и, возможно, определяется лишь геометрическими характеристиками ребра. Следует отметить, что данные расходятся для разных относительных шагов закрутки ленты s/d , причем для ленты с бесконечным шагом закрутки относительная длина восстановления значительно больше, чем для скрученных лент с конечным шагом закрутки. Это позволяет сделать вывод, что закрутка подавляет возмущающее влияние ребер.

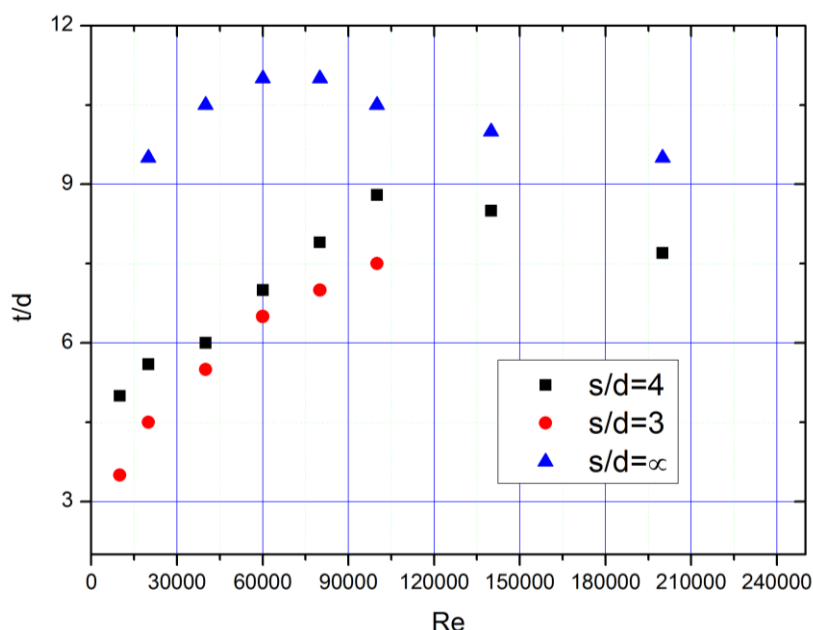


Рис. 6 Зависимость относительной длины восстановления профиля осевой скорости t/d от числа Рейнольдса для трех относительных шагов закрутки ленты $s/d=4$; $s/d=3$ и $s/d=\infty$

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления труб со вставками в ви-

де оребренных скрученных лент при турбулентном режиме течения. Полученные данные по теплоотдаче были сравнены с результатами, полученными по формуле Манглика-Берглеса (Рис. 7). Из анализа представленного графика можно сделать вывод, что установка ребер на поверхность скрученной ленты приводит к интенсификации теплообмена. Чем меньше шаг и больше высота ребер, тем выше интенсификация теплообмена. Сравнивая два крайних случая по высоте ребра соответствующих 0,5 и 1,5 мм, можно сказать, что теплоотдача труб с такими вставками отличается примерно на 36%. Как видно из графика наименьшее значение теплоотдачи имеют трубы со вставками в виде лент с ребрами малой высоты (0,5 мм). Ленты с данным типом ребер интенсифицируют теплоотдачу максимум на 8 % по сравнению с гладкими скрученными лентами.

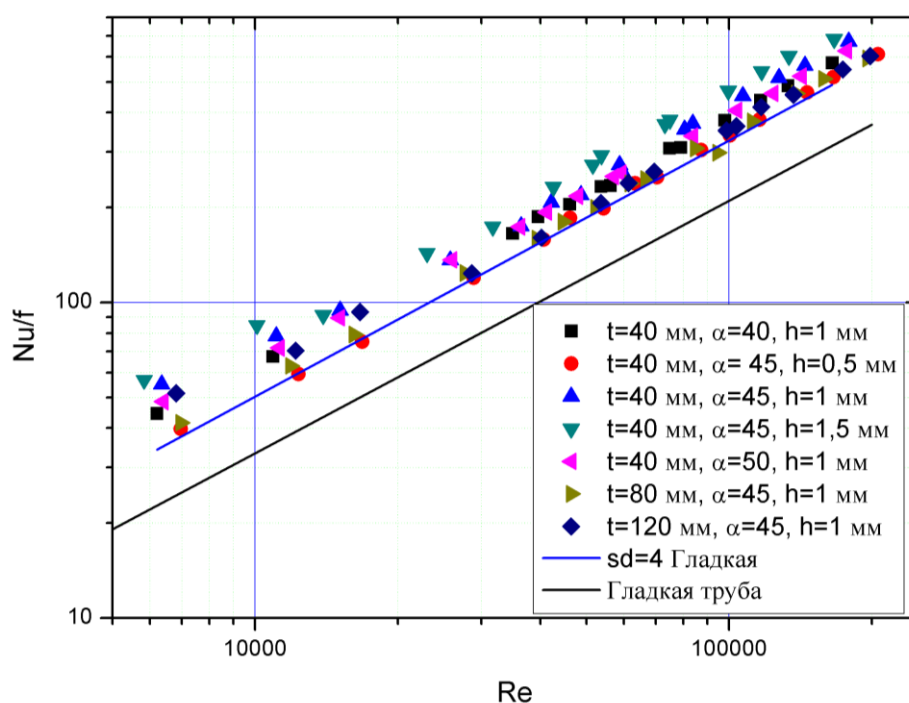


Рис. 7 Теплоотдача труб со вставками в виде скрученных лент, имеющих разные параметры оребрения при $s/d=4$: точки – экспериментальные данные, линии - расчет по формуле М.А. Михеева (гладкая труба) и Манглика-Берглеса (гладкая лента $s/d=4$)

Получены результаты экспериментального исследования коэффициента гидросопротивления в трубах со вставками в виде оребренных скрученных лент. Результаты представлены на Рис. 8. Можно сделать вывод, что ребра, дискретно установленные на поверхность скрученной ленты, существенно увеличивают гидравлическое сопротивление. Гидравлическое сопротивление увеличивается при уменьшении шага установки и увеличении высоты ребер. Сравнивая два крайних случая по высоте ребра соответствующих 0,5 и 1,5 мм, можно сказать, что гидросопротивление труб с такими вставками отличается примерно на 90%. Как видно из графика наименьшим гидравлическим

сопротивлением, которое на 40 % больше чем для труб с гладкими лентами, обладают трубы со вставками в виде лент с ребрами малой высоты (0,5 мм).

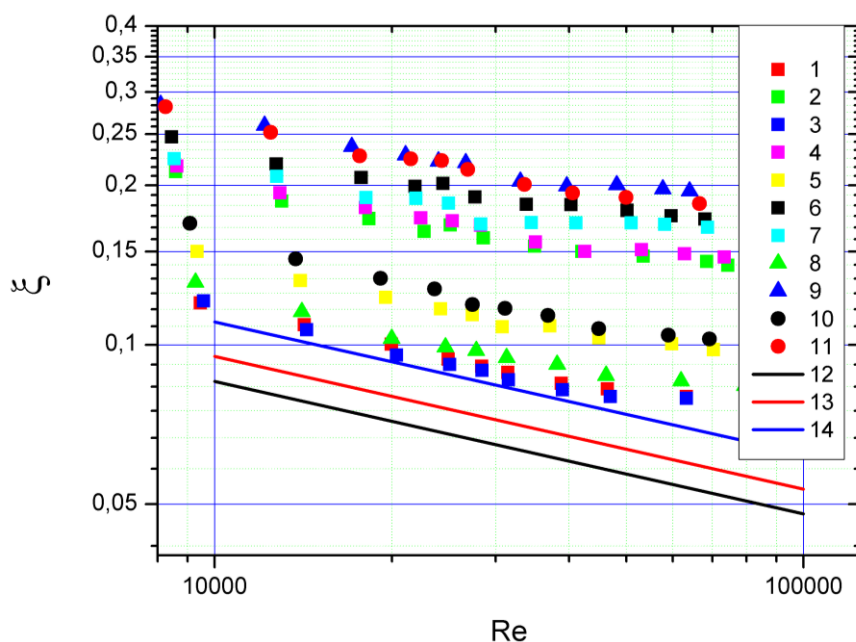


Рис. 8 Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ труб с оребренными скрученными лентами от числа Рейнольдса: точки – экспериментальные данные, линии – расчет по формуле М.Х. Ибрагимова для гладкой ленты **1** - $s/d=4$, $t=120$ мм, $h=1$ мм, $\alpha=45^\circ$; **2** - $s/d=4$, $t=40$ мм, $h=1$ мм, $\alpha=45^\circ$; **3** - $s/d=4$, $t=40$ мм, $h=0,5$ мм, $\alpha=45^\circ$; **4** - $s/d=4$, $t=40$ мм, $h=1$ мм, $\alpha=50^\circ$; **5** - $s/d=4$, $t=80$ мм, $h=1$ мм, $\alpha=45^\circ$; **6** - $s/d=4$, $t=40$ мм, $h=1,5$ мм, $\alpha=45^\circ$; **7** - $s/d=4$, $t=40$ мм, $h=1$ мм, $\alpha=40^\circ$; **8** - $s/d=3$, $t=40$ мм, $h=0,5$ мм, $\alpha=45^\circ$; **9** - $s/d=3$, $t=40$ мм, $h=1,5$ мм, $\alpha=45^\circ$; **10** - $s/d=2,5$, $t=40$ мм, $h=0,5$ мм, $\alpha=45^\circ$; **11** - $s/d=2,5$, $t=40$ мм, $h=1,5$ мм, $\alpha=45^\circ$; **12** - $s/d=4$; **13** - $s/d=3$; **14** - $s/d=2,5$;

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Создан экспериментальный стенд для исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления каналов различной формы с электрическим нагревом при одно- и двухфазных течениях, оснащенный измерительной системой и позволяющий проводить эксперименты при избыточном давлении в канале P до 10 атм.; массовым расходе теплоносителя G до 6,5 кг/с; плотности теплового потока на участке q до 3 МВт/м².

2. Чем меньше шаг и больше высота ребер, тем выше интенсификация теплообмена. Коэффициент теплоотдачи возрастает максимум на 40% для лент с ребрами высотой $h=1,5$ мм и шагом установки $t=40$ мм по сравнению с гладкой скрученной лентой. Ребра, дискретно установленные на поверхность скрученной ленты, существенно увеличивают гидравлическое сопротивление тем больше, чем меньше шаг установки и больше высота каждого отдельного ребра. Определены диапазоны оптимальных параметров ребер. Таким образом, для большинства технических устройств диапазон относи-

тельных шагов установки ребер необходимо выбирать в пределах от 3 до 8. Ребра, установленные на ленту с относительным шагом более 11-12, не оказывают существенного влияния на теплообмен и гидродинамику потока, поэтому использование ребер с данными параметрами неэффективно. Также целесообразно использовать в технических приложениях скрученные ленты с ребрами, имеющими высоту не менее 1 мм.

3. На основе экспериментального исследования получены зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления труб со вставками в виде оребренных скрученных лент. Отмечена существенная интенсификация теплообмена при использовании скрученных лент с нанесенными ребрами на поверхности скрученных лент.

4. Обобщая результаты численного исследования течения и теплообмена в трубах со вставками в виде оребренных скрученных лент можно сделать следующие основные выводы. Чем выше скорость в канале, тем более сильное возмущение генерирует ребро. Наличие ребра приводит к некоторому смещению максимума профиля скорости к теплоотдающей поверхности. С увеличением числа Рейнольдса Re увеличивается относительная длина восстановления для всех относительных шагов закрутки ленты. То есть при увеличении скорости потока, возмущения, созданные установленным ребром, проникают дальше вниз по потоку. Закрутка подавляет возмущающее влияние ребер, то есть при меньшем относительном шаге закрутки необходимо устанавливать ребра чаще.

5. Проведенные численные эксперименты в рамках двух разработанных методик указывают на то, что численный эксперимент является альтернативой экспериментальному исследованию и позволяет на этапе разработки производить не только оценочные, но и проектировочные расчеты теплоотдачи и гидросопротивления в каналах теплообменного оборудования. Сравнивая результаты, полученные с двумя моделями турбулентности: с учетом низкорейнольдсовых эффектов и методом пристеночных функций можно сказать, что первый метод дает более надежные результаты. Подход с использованием пристеночных функций в рамках $k-\varepsilon$ модели турбулентности дает заниженные результаты по теплоотдаче и, в особенности, по гидравлическому сопротивлению, так как не учитывает эффекты имеющие место в вязком подслое. Тем не менее, воспроизводимая точность вполне достаточна для решения инженерных задач, а быстрота вычислений оставляет данный подход вне конкуренции. Альтернативой использованию метода пристеночных функций является моделирование пограничного слоя до стенки, что дает более надежные результаты, но требует повышенные требования к сеточному разбиению и времени вычислений.

6. Для лент с большим относительным шагом закрутки $s/d=6$ наблюдается хорошее согласование результатов численного моделирования, полученных в подходе с низкорейнольдсовой моделью турбулентности $k-\omega SST$, с расчетной зависимостью Манглика-Берглеса для теплоотдачи. Для расчетов с $k-\varepsilon$ моделью турбулентности наблюдается более существенное расхождение данных достигающее 17%. В случае с интенсивной закрутки при малом отно-

сительном шаге скрученной ленты $s/d=2,5$ имеем максимальную относительную погрешность для численных расчетов с использованием низкорейнольдсовой модели 13%, а с пристеночными функциями 20%, причем подход с пристеночными функциями также дает заниженный результат. Для лент с большим относительным шагом закрутки $s/d=6$ наблюдается хорошее согласование результатов численного моделирования, с максимальной относительной погрешностью $\pm 7\%$, полученных в подходе с низкорейнольдсовой моделью турбулентности $k-\omega SST$, с расчетной зависимостью Ибрагимова для гидросопротивления во всей области исследованных чисел Рейнольдса. Анализируя данные численного моделирования для лент с малым относительным шагом закрутки $s/d=2,5$ можно отметить, что результаты лежат между зависимостями Ибрагимова и Манглика-Берглеса. Данные, полученные в подходе с $k-\varepsilon$ моделью турбулентности и пристеночными функциями имеют неудовлетворительное согласование, с максимальной относительной погрешностью $\pm 16\%$, с расчетной зависимостью Ибрагимова во всей области исследованных чисел Рейнольдса.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Гиниятуллин А.А., Шишкин А.В. Особенности теплообмена в трубах с различными закручивающими ленточными вставками // Тепловые процессы в технике, Москва. 2011 г., Т.3. №3, стр. 133-139

Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Гиниятуллин А.А. Экспериментальное и численное исследование теплообмена в трубах с оребренными скрученными вставками // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. ISSN 2078-6255. 2013. № 2, выпуск 2.

Работы, опубликованные в других изданиях и материалах конференций:

Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Гиниятуллин А.А. Heat Transfer in Circular Tubes With Regularly Spaced Full Length Twisted Tape Inserts Having Discrete Finned Surface // 2011 Baltic Heat Transfer Conference – 6th BHTC 2011 Tampere, Finland

Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Гиниятуллин А.А., Шишкин А.В. Heat and mass transfer in tubes with various twisted tape inserts // Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE 2011, November 11-17, 2011, Denver, Colorado, USA

Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Гиниятуллин А.А. Verification and Validation of Heat Transfer and Friction Factor in Tubes with Various Twisted Tape Inserts at One Phase Flow // Proceedings of ASME 2012 Verification & Validation Symposium May 2-4, 2012, Las Vegas, NV, USA

Тарасевич С.Э., Гиниятуллин А.А. CFD Modelling of Subcooled Boiling in Tubes with Twisted Tape Insert // Proceedings of ASME 2013 Fluids Engineering Summer Meeting FEDSM 2013, July 7-11, 2013 Incline Village, Nevada, USA

Тарасевич С.Э., Гиниятуллин А.А. Теплоотдача в кольцевых каналах с закруткой потока // XVII Туполевские чтения. Труды конференции. Том 1. Казань 2009 г.

Тарасевич С.Э., Гиниятуллин А.А. Теплоотдача в кольцевых каналах с закруткой потока // XVIII Туполевские чтения. Труды конференции. Том 2. Казань 2010 г.

Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Гиниятуллин А.А. Теплоотдача в трубах с непрерывной по длине закруткой при ламинарном течении жидкости // Сборник материалов XXIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды. Веществ материалов и изделий» Казань 2011 г. часть 2. Стр. 109-110

Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Гиниятуллин А.А. Теплоотдача в трубах со скрученными ленточными вставками при ламинарном течении жидкости // Тезисы докладов международной научной школы. «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических технологиях» Москва 2011.

Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Гиниятуллин А.А., Шишкин А.В. Особенности гидравлических характеристик потока в канале с оребренными скрученными лентами // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011»: Материалы VI Международной научно-технической конференции. 2011г. Том 2, стр. 630-635

Гиниятуллин А.А. Численное исследование гидродинамики в трубах с резбовой шероховатостью // XX Туполевские чтения. Труды конференции. Том 1 Казань. 2012г

Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Гиниятуллин А.А., Шишкин А.В. Особенности тепломассообмена в каналах с оребренными скрученными лентами // VIII Школа-Семинар молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. Россия, Казань 16-18 октября 2012г.

Тарасевич С.Э., Гиниятуллин А.А. Экспериментальный стенд для исследования теплогидравлических характеристик теплообменных аппаратов различных типов // XXI Туполевские чтения. Труды конференции. Том 2 Казань. 2013г.

Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Гиниятуллин А.А. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление труб с оребренными скрученными ленточными вставками // VI Российская Национальная Конференция по Теплообмену «РНКТ-6» 26-31 октября, 2014, Москва, Россия

Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Гиниятуллин А.А., Шишкин А.В. Characteristic features of heat and mass transfer in channels with ribbed twisted tape inserts // XIV Minsk International Heat and Mass Transfer Forum, ISBN 978-985-6456-80-3 ММФ-XIV-2012