

На правах рукописи



ШИШКИН АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ТЕПЛООТДАЧА ПРИ КИПЕНИИ ХЛАДАГЕНТА R134A В КАНАЛАХ
СО ВСТАВКАМИ В ВИДЕ ОРЕБРЕННЫХ СКРУЧЕННЫХ ЛЕНТ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» в лаборатории моделирования физико-технических процессов кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Тарасевич Станислав Эдуардович

Официальные оппоненты: Комов Александр Тимофеевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет МЭИ», профессор кафедры «Общей физики и ядерного синтеза»

Кирсанов Юрий Анатольевич,
доктор технических наук, доцент
ФГБУН «Казанский научный центр Российской академии наук», ведущий научный сотрудник лаборатории теплофизических исследований

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Защита диссертации состоится « 05 » октября 2016 года в 12 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.079.02 при ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» и на сайте <http://www.kai.ru/science/disser/index.phtml>.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Д.212.079.02,
к.т.н., доцент



А.Г. Каримова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Интерес к интенсификации теплообмена возник одновременно с решением задач проектирования теплообменных аппаратов с ограниченными весогабаритными характеристиками, имеющими высокую надежность при эксплуатации. Теплообменные аппараты с различными интенсификаторами могут выравнивать и снижать рабочие температуры стенок, предотвращая разрушение активной зоны тепловыделения в случае аварийных ситуаций, увеличивая надежность и безопасность работы.

К одному из способов интенсификации теплообмена относится закрутка потока. Среди многообразия конструктивных элементов, позволяющих закручивать поток, широкое применение в использовании получили вставки в виде скрученных лент, т.к. они недороги в изготовлении и могут быть легко использованы для модернизации существующих кожухотрубных теплообменников. Кроме того, конструкция теплообменников с использованием скрученных лент позволяет существенно сократить весогабаритные характеристики при заданной тепловой нагрузке, тем самым снижая капиталовложения.

Использование скрученных лент позволяет обеспечивать безаварийное и эффективное охлаждение различных энергонапряженных элементов при высоких плотностях теплового потока, расширяя область применения в качестве турбулизаторов закручивающих пристенные слои при однофазном течении теплоносителя, при течении двухфазных потоков обеспечивают увеличение коэффициента теплоотдачи, за счет закрутки потока происходит выравнивание температурных неоднородностей в азимутальном направлении. Закрутка потока при высоких паросодержаниях может способствовать увеличению области бескризисного теплообмена при кипении за счет сепарации жидкой фазы на поверхность. При кипении в каналах со вставленными скрученными лентами при высоких паросодержаниях возникают устойчивые шнуровидные течения, когда жидкая фаза движется в виде струи (шнура) по центральной части ленты, не являющейся активной теплообменной поверхностью. При кипении это может приводить к увеличению необходимой для полного испарения жидкости длины. Существующие геометрические модификации скрученных лент используются в теплообменном оборудовании при вынужденной конвекции теплоносителя и не решают проблему по устранению шнуровидных течений.

Настоящая диссертация работа посвящена экспериментальному исследованию теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставленными скрученными лентами, имеющими ребра на своей поверхности.

Степень разработанности. Полученные результаты в работах по исследованию теплообмена и гидродинамики двухфазных закрученных течений Ибрагимова М.Х., Номофилова Е.В., Субботина В.И., Берглеса А.И., Щукина В.К., Manglik R.M., Klaczak A., Назмеева Ю.Г., Николаева Н.А., Agrawal K.N., Varma H.K., Lai S., Шатто Д.П., Петерсона Г.П., Халатова А.А., Тарасевича С.Э., Яковлева А.Б., А.Н., Дедова А.В., Комова А.Т., Ягова В.В., Захарова Е.М., Букина В.Г., Минеева Ю.В., Кузьма-Кичта Ю.А., Кутепова А.М., Gambill W.R., Kanizawa F.T., Ribatski G., и др., имеют ограниченный характер применения рекомендаций по расчету коэффициента теплоотдачи в каналах с закруткой потока. Информация о теплоотдаче при кипении в каналах со вставленными скрученными лентами модифицированной геометрии, находящейся в открытом доступе, практически отсутствует.

Цель и задачи исследования. На основе проведенного литературного обзора поставлена **основная цель** работы: разработка рекомендаций по расчету теплоотдачи каналов со вставками в виде оребренных скрученных лент, необходимых для создания эффективных теплообменных аппаратов общего и специального назначения на основе выявленных механизмов интенсификации теплоотдачи.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

1. Разработать и создать экспериментальный стенд для исследования теплоотдачи двухфазного потока при течении хладагента R134a в каналах.

2. Провести экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде гладких и оребренных скрученных лент.

3. На основе экспериментальных данных получить обобщающие зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

4. Разработать практические рекомендации по использованию интенсификаторов теплообмена в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные обобщающие зависимости для определения теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент могут быть использованы на предприятиях при проектировании нового эффективного теплообменного оборудования, так и для модернизации нового и уже существующего оборудования. Выполненная работа также расширяет фундаментальные знания о теплоотдаче и режимах течения при кипении в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

Материалы работы могут быть использованы в учебном процессе и на предприятиях, занимающихся проектированием и изготовлением теплообменных аппаратов и энергетического оборудования. Созданный автором 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 следующих проектов: 1. ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по проекту «Разработка ресурсосберегающих технологий использования криогенных топлив» государственный контракт № П2467 от «09» ноября 2009 г. (руководитель к.т.н. Яковлев А.Б.); 2. Проект №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» (руководитель д.т.н., проф. Тарасевич С.Э.); 3. Проект 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» (руководитель к.т.н., доцент Яковлев А.Б.); 4. Проект 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» (руководитель к.т.н. Рыжков Д.В.); 5. Проект РФФИ 13-08-0469 А «Экспериментальное и численное исследование теплообмена и гидродинамики в каналах с различными закручивающими вставками при одно- и двухфазных течениях» (руководитель к.т.н. Яковлев А.Б.); 6. Проект РФФИ 14-08-31178 мол_а «Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик двухфазных течений при кипении хладагентов R134a и R507a в каналах различной формы» (руководитель Шишкин А.В.); 7. Проект РФФИ 14-08-31305 мол_а «Разработка и исследование теплогидравлических характеристик теплообменных аппаратов для транспортных систем с различными типами интенсификаторов теплоотдачи» (руководитель Яркаев М.З.); 8. Проект №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» (руководитель д.ф.-м.н., проф. Исаев С.А.); 9. ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (соглашении о субсидии N14.577.21.0151 от 28.11.2014, идентификатор проекта RFMEFI57714X0151). (руководитель д.ф.-м.н., проф. Тукмаков А.Л.); 10. Проектная часть государственного задания N13.262.201.2014К. «Разработка эффективного поршневого уплотнения для двигателей внутреннего сгорания, работающих на сжиженном газообразном топливе с добавлением воды в рабочем процессе» (руководитель д.т.н., проф. Гуреев В.М.).

Личный вклад автора. Автором лично проанализированы описанные в литературе результаты исследований по теплоотдаче в условиях вынужденной конвекции и пузырькового кипения в каналах со вставками в виде гладких скрученных лент и скрученными лентами модифицированной геометрии, сформулированы основная цель и задачи исследования; разработан и создан экспериментальный стенд в соответствии с задачами исследования; разработан рабочий участок для проведения экспериментальных исследований; проведено экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде гладких и оребренных скрученных лент; выполнены обработка, анализ и обобщение результатов с получением зависимости для расчета теплоотдачи.

Методология и методы исследования. Объектом исследования являются каналы со вставками в виде гладких и оребренных скрученных лент. Для получения информации о теплоотдаче при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент при различных геометрических и режимных параметрах использовались экспериментальные методы исследования. В экспериментах реализовывался омический нагрев рабочего участка (ГОСТ Р 8.655-2009). Вынужденное течение в трубах реализовывалось на экспериментальном стенде с аттестованными приборами измерений расходов (ГОСТ Р 50193.3-92), температуры (ГОСТ Р 8.585-2001 ГСИ) и давления (ГОСТ 22520-85).

Визуализация режимов течения производилась высокоскоростной видеосъемкой.

Научная новизна.

1. Проведено экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде гладких и оребренных скрученных лент с одновременной видеофиксацией режима течения на выходе из рабочего участка при числах Рейнольдса подсчитанного по скорости циркуляции жидкости $Re_0=31000\div 85000$ и плотности теплового потока $q=100\div 250$ кВт/м².

2. Выявлено влияние безразмерных геометрических и режимных параметров на теплоотдачу при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

3. На основе визуального наблюдения выявлены режимы течения реализуемые в условиях кипения хладагента R134 в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

4. Получена обобщающая зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

5. Разработаны практические рекомендации по использованию интенсификаторов теплообмена в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

Отмеченные выше научные результаты составляют основное содержание положений, выносимых на защиту диссертации.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов подтверждаются проведением тестовых опытов и хорошим согласованием полученных результатов с результатами других исследователей; использованием поверенных приборов и измерительной системы; выполнением процедур тарировки и калибровки датчиков; проведением процедуры оценки неопределенности измерений в соответствии с ГОСТ Р 54500.3-2011; использованием современных компьютерных, аппаратных и программных средств для обработки данных; соответствием полученных результатов физическим представлениям о процессах теплообмена в условиях одно- и двухфазного течения потока.

Апробация результатов работы. Полученные основные результаты докладывались и получили положительные отзывы на отечественных и зарубежных конференциях: 1. Международной молодёжной научной конференции «Туполевские чтения» (г. Казань, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 г.); 2. Международном машиностроительном конгрессе «ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (США, г. Денвер, 2011 г.); 3. 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 г.); 4. Шестой международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ» (г. Казань, 2011); 5. Четвертой международной конференции «Теплообмен и гидродинамика в закрученных течениях» (г. Москва, 2011 г.); 6. VIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН Алемасова В.Е. (г. Казань, 2012 г.); 7. Международном симпозиуме «15th International Symposium on Flow Visualization» (Беларусь, г. Минск, 2012 г.); 8. Минском международном форуме по теплообмену «Minsk International Heat and Mass Transfer Forum» (Беларусь, г. Минск, 2012, 2016 г.); 9. XIX Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика Леонтьева А.И. «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических технологиях» (г. Орехово – Зуево, 2013 г.); 10. Международной конференции по теплообмену «15th International Heat Transfer Conference» (Япония, г. Киото, 2014 г.); 11. Пятой международной конференции «Теплообмен и гидродинамика в закрученных течениях» (г. Казань, 2015 г.).

Работа отмечена дипломами различных степеней на всероссийских и международных конференциях.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 23 печатных работы (4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК; 1 статья в изданиях из списка Web of Science; 12 докладов в сборниках трудов конференций и 6 тезисов доклада).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, и списка литературы. Объем диссертации составляет 122 страницы машинописного текста, включая 56 рисунков и 4 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проанализировано современное состояние рассматриваемой проблемы и сформулированы задачи настоящего исследования. Выполнен критический анализ результатов исследований по теплоотдаче в условиях вынужденной конвекции и пузырькового кипения в каналах со вставками в виде гладких скрученных лент и скрученных лент модифицированной геометрии.

При анализе данных литературного обзора, установлено, что в настоящее время хорошо изучены процессы теплообмена и гидродинамики в каналах со вставленными скрученными гладкими (классическими) лентами при однофазном течении рабочего вещества. Получены обобщающие зависимости для расчета теплоотдачи и гидравлического сопротивления (В.К. Щукин, А.Е. Берглес, М.Х. Ибрагимов, Е.В. Номофилов, В.И. Субботин, А.Н. Варава, А.Т. Комов, А.В. Дедов, Е.М. Захаров, С.А. Малаховский, А.А. Халатов, Р. Кох, Е. Смитберг и Ф. Лэндис, У. Гэмбил и Р. Банди). Отмечена тенденция роста работ посвященных исследованию теплоотдачи и гидродинамики в каналах с различными модификациями геометрии скрученных лент при вынужденной конвекции, однако диапазон исследованных режимных параметров, геометрий и рабочих тел весьма ограничен.

Работы по исследованию теплоотдачи при кипении жидкости в каналах с закруткой потока выполнены только с использованием классических скрученных лент (М.А. Akhavan-Behabadi, А.Е. Берглес, С.Э. Тарасевич, А.В. Дедов, К.Н. Agrawal, М.А. Kedzierski, М.К. Jensen, Н.Р. Bensler, В.Г. Букин, Ю.В. Минеев, F.T. Kanizawa, G. Ribatski) при течении хладагентов, воды и жидкого азота, в большинстве работ в качестве рабочего тела использовались галогенуглеводородные хладагенты при горизонтальном расположении рабочего участка с использованием электрического нагрева для лент с относительными шагами закрутки $y=s/d$ от 2,5 до 15 для диаметров труб d от 3,8 до 15,9 мм изготовленных из нержавеющей стали и

алюминия при низких массовых скоростях и низких плотностях теплового потока ρw менее 350 кг/м²с и $q < 50$ кВт/м² соответственно.

Информация о теплоотдаче при кипении в каналах со вставленными скрученными лентами модифицированной геометрии, находящейся в открытом доступе, практически отсутствует. Как было отмечено выше в каналах со вставленной скрученной лентой при течении двухфазного потока, часть жидкости в виде «шнура» находится на оси ленты. Для предотвращения устойчивых шнуровидных течений на ленте на ее поверхности могут быть установлены ребра под углом к ее оси. Согласно результатов исследований С.Э. Тарасевича, А.Б. Яковлева установлено, что наличие ребер на ленте, действительно приводит к предотвращению шнуровидного режима в канале, что должно позитивно сказываться при использовании данного устройства в условиях кипения. Наилучшие результаты по разрушению шнуровидных течений на ленте и устойчивости кольцевого течения на стенке трубы показало применение интенсификатора в виде скрученной ленты с ребрами на ее поверхности, расположенными под углом 45° к оси ленты против направления ее скручивания. Однако данные исследований получены для адиабатных (водо-воздушных) течений, что связано со сложностью подобных исследований в условиях теплообмена и фазовых переходов и требуют дополнительных исследований в реальных условиях работы теплообменного оборудования.

В работе А.А. Гиниятуллина были определены диапазоны геометрических параметров оребрения скрученной ленты в условиях вынужденной конвекции при интенсификации теплообмена, согласно которой автор рекомендует устанавливать ребра на ленту с относительным шагом не более $t/d=11\div 12$, высотой ребра не менее $h=1$ мм, под углом $\varphi=45^\circ$ к оси ленты.

Во второй главе подробно изложено описание разработанного и созданного автоматизированного экспериментального стенда для исследования теплоотдачи при кипении хладагента R134a в различных каналах, рабочего участка, системы измерений, методики проведения эксперимента, методики обработки экспериментальных данных, процедуры оценки неопределенности измерений, проведены тестовые опыты по теплоотдаче для проверки работоспособности экспериментальной установки и подтверждения достоверности получаемых результатов.

Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1. Стенд состоит из: системы подачи рабочих тел; системы автоматической стабилизации рабочих параметров (давление, температура, расход); системы нагрева рабочего участка, системы измерений (рисунок 2).

Система подачи рабочих тел включает в себя: поршневой компрессор 1 (ВоскHGХ22е/190-4s); воздушный конденсатор 5 (Q7-24 T-cool); ресивер 7 (Becool BC-LR, объем – 16 литров); фильтр-осушитель влаги 8 (DCL 164S); запорные вентиля; предохранительный и обратные клапана; ТРВ 10 (DanfossTEN2), ТРВ 13 (Danfoss TES2); водяной конденсатор 17; смотровые окна 19, 20 (SGN12S); детандер 30 (BecoolBC-LR, объем-40 литров); вакуумно-зарядная станция 32 (CPSPRO-SET CR700); испаритель 36, нагрев которого осуществляется лабораторным автотрансформатором (FNEXTSGC2-30); фильтр-отделитель 38 (AlcoA13-509); фильтр-очиститель 39; зарядная батарея 41.

Система автоматической стабилизации рабочих параметров поддерживает задаваемые параметры потока. Система нагрева рабочего участка обеспечивает требуемый омический нагрев рабочего участка переменным током с помощью трансформатора марки ТСС-160/0.5 УЗА. Регулирование напряжения на первичной обмотке которого, осуществляется регулировочным трансформатором РОТМ-100/0.5, который позволяет изменять напряжение трехфазной сети от 10 до 380 вольт. Система измерений обеспечивает съем, обработку и индикацию данных полученных в ходе проведения эксперимента. В данную систему входят: первичные преобразователи температуры, избыточного давления, дифференциального давления, расхода, напряжения и силы тока нагревающего рабочий участок, блоки питания

первичных преобразователей, изотермические клеммные блоки, модули согласования, измерительный комплекс.

Рабочий участок для проведения исследований теплоотдачи при кипении хладагента R134a в прямых трубах, в том числе со вставленной скрученной лентой, представляет собой горизонтально расположенную трубу из нержавеющей стали с внутренним диаметром $d=10$ мм, толщиной стенки $\delta=1$ мм, и длиной $L=500$ мм (рисунок 3). По всей длине рабочего участка равномерно расположены в 8 сечениях 16 термопар, по 2 в каждом сечении (0° , 270°). Корольки термопар изготовлены из проводов хромель-копель диаметром $d=0,2$ мм, и длиной $L=2100$ мм. Для предотвращения электрических наводок на сигнал с термопар при пропускании переменного тока через рабочий участок, линии связи подключались к изотермическому клеммному блоку ТВХ-1328, блок имеет гальваническую развязку между каналами, что предотвращает образование помех. Дополнительно линии связи экранировались металлической оплеткой. Для каждой термопары получена индивидуальная тарировочная зависимость. Рабочий участок изолирован асбестовой нитью ШАОН $d=3$ мм, поверх которой крепится теплоизоляционная труба из вспененного полиэтилена Energoflex super.

При проведении экспериментального исследования теплоотдачи при кипении хладагента R134a важное значение имеет идентификация с режимными параметрами, а именно определение режима (структуры) течения. Для этого за рабочим участком был установлен участок визуализации потока (рисунок 4), основным элементом которого является кварцевая трубка с внутренним диаметром $d=10$ мм, и толщиной стенки $\delta=2,5$ мм, длиной $L=150$ мм. В рабочий участок вставляются скрученные ленты свободной посадкой. Исследовались гладкие ленты и оребренные скрученные ленты (рисунок 5). Относительные шаги закрутки для исследуемых лент составляли $y=s/d=3; 4; 6$, где s – шаг закрутки при повороте на 180° , d – диаметр трубы. На ленту приваривались ребра из нержавеющей проволоки диаметром $d=1$ мм, при помощи автомата контактной точечной сварки. Для электрической изоляции между лентой и стенкой канала, ленты покрывались порошковой термостойкой краской с последующим запеканием в печи.

В работах проведенных А.А. Гиниятуллиным на воде, были определены эффективные параметры ребер, поэтому в настоящем исследовании выбраны именно эти же параметры оребрения: $t=60; 40; 20$ мм, при фиксированных значениях высоты ребра $h=1$ мм и угла установки $\varphi=45^\circ$. Ребра устанавливались против направления скручивания ленты.

Измерительная система построена на базе модульной платформы PXI/SCXI производства National Instruments. Программирование системы производится в графической среде разработки LabVIEW. При запуске программы производится считывание конфигурационных файлов, содержащих описание измерительных каналов и сразу же начинается общий цикл измерений. Время опроса, обработки и записи экспериментальных данных в файл составляет 3,081 мс. Одновременно с записью экспериментальных данных на ЭВМ проходила видеосъемка режимов течения при помощи высокоскоростной видеокамеры Photron Fastcam SA4-500K-C1 с оптическими системами Nikon Nikkor AF 60 мм F/2.8D Micro и Navitar DO-2595 (25мм F/0.95).

Экспериментальный стенд позволяет проводить эксперименты в широком диапазоне режимных параметров: массового расхода хладагента до 0.5 кг/с, плотности теплового потока на участке q до 0.35 МВт/м², обеспечивая высокий контроль и стабилизацию заданных параметров.

Температура потока в отдельных сечениях по длине рабочего участка определялась через уравнение теплового баланса и замеренной входной температуре.

В связи с тем, что ленты были электроизолированы термостойкой краской, а также установка лент осуществлялась свободной посадкой, тепловой поток через ленту принимался равным нулю.

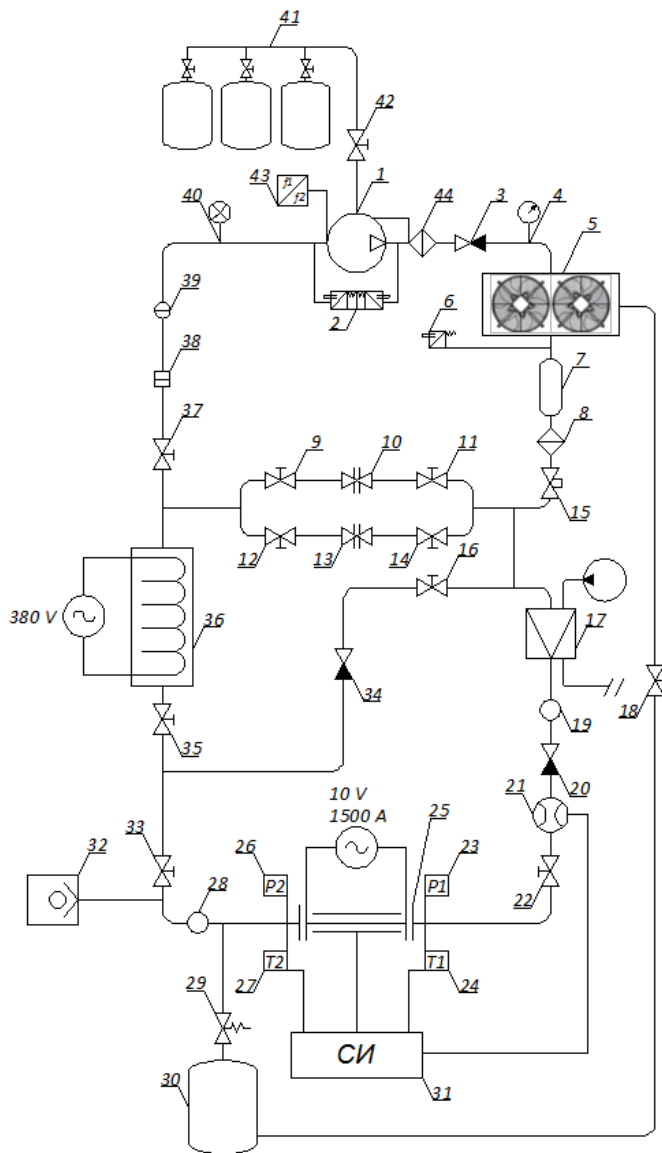


Рисунок 1. Принципиальная схема экспериментального стенда:

1 – Компрессор; 2 – Реле давления сдвоенное; 3, 20, 34 – Обратный клапан; 4 – Манометр; 5 – Конденсатор воздушный; 6 – Реле давления высокое; 7, 30 – Резервуар; 8 – Фильтр осушитель; 9, 11, 12, 14, 16, 18, 22, 33, 35, 37, 42 – Запорные вентили; 10, 13 – ТРВ; 15 – Соленоидный вентиль; 17 – Конденсатор водяной; 19, 28 – Смотровые окна; 21 – Датчик расхода; 23, 26 – Датчики давления; 24, 27 – Датчик температуры; 25 – Рабочий участок; 29 – Предохранительный клапан; 32 – Вакуумно-зарядная станция; 36 – Испаритель; 38 – Фильтр-отделитель; 39 – Фильтр-очиститель; 40 – Термостат; 41 – Зарядная батарея; 43 – Преобразователь частоты; 44 – Маслоотделитель



Рисунок 2. Общий вид экспериментального стенда

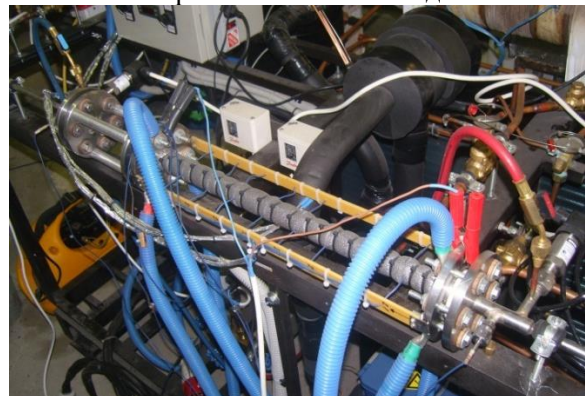


Рисунок 3. Фотография рабочего участка

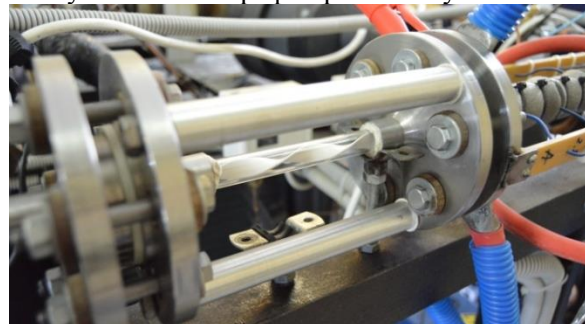


Рисунок 4. Фотография участка визуализации потока

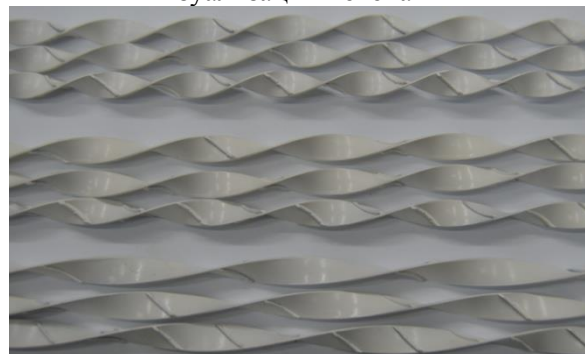


Рисунок 5. Фотография оребренных скрученных лент

Статическое давление в каждом сечении рабочего участка определялось путем линейной интерполяции между значениями давления на входе и выходе. Температура насыщения на входе и выходе определялась по показаниям датчиков давления.

Согласно рекомендациям изложенным Н.Г. Стюшиным принималось, что при условии когда $t_{fi} < t_{si}$, расчет свойств жидкости производится по значению t_{fi} , а при $t_{fi} > t_{si}$, расчет производится по значению t_{si} .

Массовое расходное паросодержание в i -том сечении определялось по подведенному тепловому потоку в этом сечении.

Местный коэффициент теплоотдачи определялся по уравнению Ньютона-Рихмана.

Данные о теплофизических свойствах жидкости и сухого пара на линии насыщения хладагента R134a определялись по международной базе данных REFPROP Version 9.1.

Согласно результатов процедуры оценки неопределенности измерений, выполненной в соответствии с методикой, подробно описанной в ГОСТ Р 54500.3-2011/Руководства ИСО/МЭК 98-3:2008 Часть 3, максимальная неопределенность измерений, выраженная в относительных единицах для числа Нуссельта – до $\pm 13,7\%$, числа Рейнольдса – до $\pm 1,2\%$.

Для оценки работоспособности экспериментального стенда, а также для подтверждения достоверности получаемых результатов были проведены тестовые опыты по теплоотдаче в условиях вынужденной конвекции и пузырькового кипения.

Экспериментальные данные по теплоотдаче в условиях вынужденной конвекции при течении однофазного потока хладагента R134a в прямой трубе сравнивались с расчетными значениями по известной зависимости М.А. Михеева для турбулентного режима течения, максимальная относительная погрешность расчетных данных относительно опытных не превышает $+1$ и -15% .

Экспериментальные данные по теплоотдаче при пузырьковом кипении R134a в прямой трубе сравнивались с расчетными значениями по методике Н.Г. Стюшина (1):

$$\begin{aligned} M &= K_w' (Pe_{исп}')^{-1/3} K_s^{0,5}; \\ \text{при } M \geq 0,3 \cdot 10^{-5}: St(K_p')^{-1/3} &= 1,25 K_w' (Pe_{исп}')^{-1/3} K_s^{0,5}; \\ \text{при } 0,01 \cdot 10^{-5} < M < 0,3 \cdot 10^{-5}: St(K_p')^{-1/3} &= 0,002 (K_w' Pe_{исп}'^{-1/3} K_s^{0,5})^{0,5}; \text{ где:} \end{aligned} \quad (1)$$

$$St = \frac{\alpha}{C_p \rho_{ж} w_{см}}; \quad Pe_{исп}' = \left(\frac{qPr}{r \rho_{г} v_{г}} \right) \sqrt{\frac{\sigma}{g \rho_{г}}}; \quad K_s = \frac{r}{C_p T_s}; \quad K_w' = \frac{q}{r \rho_{ж} w_{см}}; \quad K_p' = \left(\frac{P}{\sigma} \right) \left(\frac{\sigma}{g \rho_{г}} \right)^{0,5}.$$

Максимальная относительная погрешность расчетных данных относительно экспериментальных не превышает $\pm 27\%$. Проведенные тестовые опыты по теплоотдаче в условиях вынужденной конвекции и пузырькового кипения хладагента R134a показывают удовлетворительную работу экспериментального стенда и подтверждают достоверность получаемых результатов.

Дополнительно с целью получения информации о существовании шнуровидного режима течения в реальных условиях теплообменного оборудования, в тестовом режиме было выполнено визуальное наблюдение режимов течения реализуемых при кипении хладагента R134a в каналах со вставленными скрученными лентами. Были выявлены расслоенный режим; эмульсионный режим; кольцевой режим при относительно малой скорости смеси с высокоамплитудными волнами на поверхности; кольцевой режим при относительно высокой скорости смеси; пузырьковый режим при относительно высокой скорости смеси; шнуровидный режим. Шнуровидный режим течения можно наблюдать при больших паросодержаниях потока $X > 0,8$, и только, когда пленка жидкости имеет достаточно малую толщину, что бы идентифицировать данный режим через слой жидкости (рисунок 6).



Рисунок 6. Фотография шнуровидного режима течения при кипении хладагента R134a в трубе со скрученной лентой при $p=550$ кПа

Таким образом, впервые визуально подтверждено наличие шнуровидного течения жидкости на оси скрученной ленты в условиях теплообмена.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования теплоотдачи при течении хладагента R134a в каналах со вставленными скрученными оребренными лентами в условиях вынужденной конвекции и пузырькового кипения, показаны режимы течений, реализуемые при данных условиях. Представлены критериальные зависимости, обобщающие экспериментальные данные по теплоотдаче при кипении хладагента.

Экспериментальное исследование теплоотдачи при вынужденном движении хладагента R134a в каналах со вставленными гладкими и оребренными скрученными лентами было выполнено при следующих режимных параметрах: $Re=30000\div 120000$; $q=0.7\div 50$ кВт/м²; $p=0.4\div 1.0$ МПа; диаметр канала $d=0,001$ м.

Полученные экспериментальные данные по теплоотдаче при вынужденном движении R134a в канале со вставленными гладкими скрученными лентами $y=2,5$ и 4 хорошо согласуются с расчетными значениями, полученными по зависимости Манглика-Бергеса (рисунок 7). Экспериментальные данные по теплоотдаче при течении R134a в канале со скрученной лентой с ребрами на поверхности $y=4$, $h=1$ мм, $t=40$ мм, $\varphi=45^\circ$ сравнивались с расчетной зависимостью (2) полученной А.А. Гиниятуллиным. Результаты данного сравнения представлены на рисунке 7.

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4} \left(1 + \frac{0,769}{s/d}\right) \cdot \left(\frac{\pi}{\pi - 4\delta/d}\right)^{0,8} \cdot \left(\frac{\pi + 2 - 2\delta/d}{\pi - 4\delta/d}\right)^{0,2} \cdot (1 + 59 \cdot (h/t)^{1,5}) \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_{ст}}\right)^{0,18} \quad (2)$$

Прирост теплоотдачи с лентой имеющей ребра на своей поверхности относительно гладкой скрученной лентой с относительным шагом закрутки $s/d=4$ при течении хладагента R134a, составляет 23%, данный уровень интенсификации удовлетворительным образом согласуется с данными, полученными на воде. Максимальное отклонение экспериментальных данных от значений, рассчитанных по зависимости (2) составляет не более 17,6%.

Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставленными гладкими и оребренными скрученными лентами проведено в диапазоне режимных параметров: число Рейнольдса по скорости циркуляции жидкости $Re_0=30000\div 85000$, плотность теплового потока $q=99\div 250$ кВт/м², расчетное массовое расходное паросодержание по подведенному тепловому потоку на выходе из рабочего участка достигало $X=0,07\div 0,55$. Относительная длина трубы $L/d=50$.

Как было отмечено ранее, теплогидравлические характеристики потока тесно связаны с режимом течения, учитывая этот факт запись экспериментальных данных на ЭВМ производилась с одновременной видеофиксацией режима течения на выходе из рабочего участка.

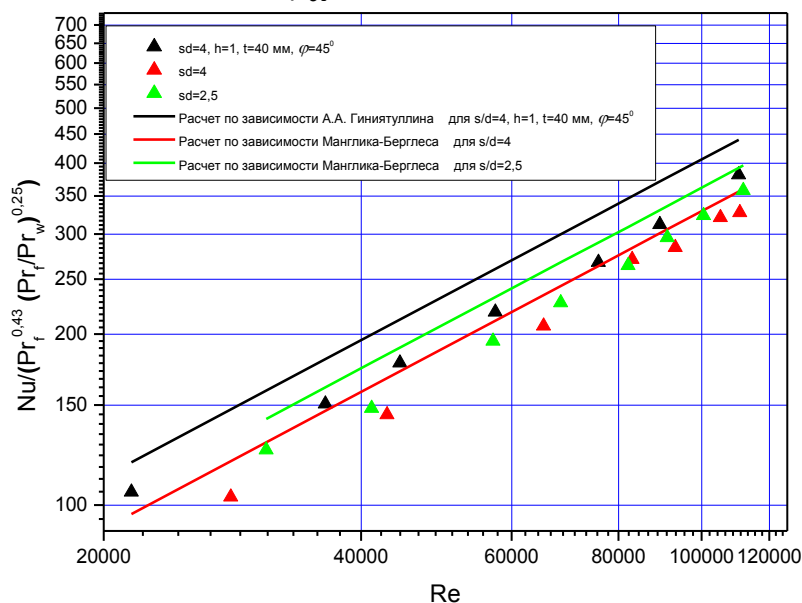


Рисунок 7. Теплоотдача при течении R134a в каналах со вставленными скрученными лентами.

При визуальном наблюдении режима течения в прямолинейном канале при числах Рейнольдса $Re_0=30000\div 85000$ и $X=0,07\div 0,55$ зафиксирован кольцевой режим. При числах $Re_0\approx 31000$ наблюдаются эпизодические разрывы пленки жидкости в верхней части канала. Во всех наблюдаемых случаях пленка жидкости у нижней образующей канала значительно толще, чем у ее верхней образующей, благодаря гравитационным эффектам, вызывающим стекание жидкости по стенке.

Измерение температур проводилось в двух точках по окружности поперечного сечения a и b (0° и 270° соответственно). Как показали измерения температура стенки в верхней образующей несколько выше, чем в нижней, вследствие неравномерного распределения жидкости в поперечном сечении канала. Максимальное расхождение температуры стенки в поперечном сечении зафиксировано на выходе из рабочего участка, где паросодержание потока имеет наибольшее значение, и составляет 1.25°C .

На рисунках 8(a) - 9(a) представлены первичные данные типичных температурных полей стенки и температуры потока по длине канала со вставленной гладкой скрученной лентой $y=3$. Как видно из данных графиков, максимальное среднеквадратичное отклонение температур стенки в i -ом сечении a и b составляет $0,36^\circ\text{C}$. Такое малое расхождение показаний температур стенки, свидетельствует о равномерном распределении жидкости в поперечном сечении, а также о высокой степени точности полученных экспериментальных данных в результате использования современной измерительной системы и корректным проведением тарировочных и калибровочных процедур. Во всем исследуемом диапазоне режимных параметров при кипении хладагента R134a в каналах со вставленными гладкими скрученными лентами наблюдался кольцевой режим течения без разрывов пленки жидкости, подтверждающий равномерное распределение ее в поперечном сечении (рисунок 10). Вследствие того, что расхождение показаний температур стенок канала измеряемых в поперечном сечении незначительно и находится в области неопределенности измерения, температура стенки канала в дальнейшем определялась, как среднее значение показаний температур в данном сечении. Как видно из графиков, температурные поля стенки канала при $Re_0=const=31200$ и $q=var=100\div 250$ кВт/м² расслаиваются с изменением плотности теплового потока q . Больше влияние на изменение температуры стенки оказывает тепловая нагрузка, подводимая к рабочему участку (рисунок 8, б). Влияния числа Рейнольдса в диапазоне значений $Re_0=(3,1\div 8,3)\cdot 10^4$ при $q=const$ не обнаружено. Это свидетельствует, о превалирующем влиянии механизма парообразования. В работе А.В. Дедова по теплоотдаче при пузырьковом кипении воды в каналах со вставленными скрученными лентами в условиях одностороннего нагрева при давлении $p=1.0$ и 2.0 МПа, массовой скорости $\rho_w=350\div 11300$ кг/(м²с) отмечено, что при массовых скоростях менее 2200 кг/(м²с) реализуются режимы теплообмена с преобладающим влиянием механизмов пузырькового кипения, когда коэффициент теплоотдачи практически не зависит от скорости течения.

На рисунке 11 представлены локальные значения коэффициента теплоотдачи при кипении в канале со скрученными лентами имеющие различные относительные шаги закрутки $y=3$; $y=4$; $y=6$. Как видно из графика, увеличение коэффициента теплоотдачи происходит с уменьшением относительного шага закрутки ленты, в следствии возрастающего воздействия массовых сил как в поперечном сечении, так и по длине рабочего участка. Уменьшение относительного шага закрутки приводит к увеличению отвода пара от теплообменной поверхности. Увеличение гидравлического сопротивления приводит к снижению температуры насыщения t_s , в результате которого снижаются температуры начала кипения при прочих равных условиях.

Анализируя представленные данные по теплоотдаче, можно сделать вывод, что использование скрученных лент способствует выравниванию температурных неоднородностей в азимутальном направлении, а также, что установка скрученных лент приводит к существенной интенсификации теплообмена. Увеличение коэффициента теплоотдачи α происходит с уменьшением относительного шага закрутки $y=s/d$.

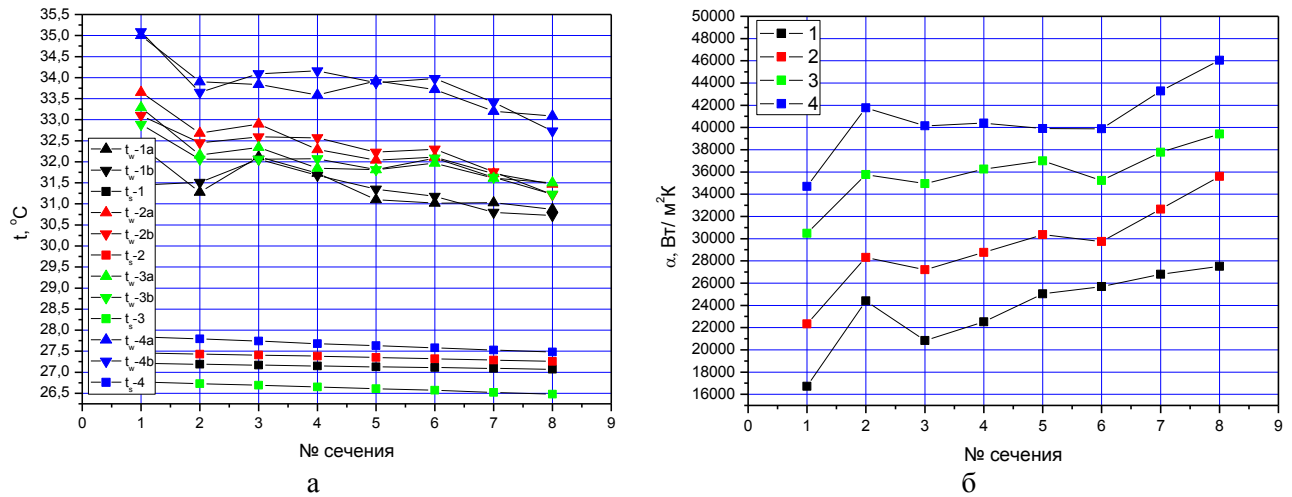


Рисунок 8. а) температурные поля стенки рабочего участка (сечение 0° - a ; 270° - b) и температуры потока; б) локальные значения коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента R134a в канале со вставленной скрученной лентой $y=3$ при $Re_0=const=31200$:

- | | | | | |
|-----------------------------------|----------------|---------------------|------------------------|-------------|
| 1) $q=102,5$ кВт/м ² ; | $p=613,3$ кПа; | $t_{BX} = 23,7$ °C; | $\Delta t = -1,43$ °C; | $X=0,215$; |
| 2) $q=145,2$ кВт/м ² ; | $p=620,2$ кПа; | $t_{BX} = 23,9$ °C; | $\Delta t = -0,59$ °C; | $X=0,315$; |
| 3) $q=192,5$ кВт/м ² ; | $p=604,6$ кПа; | $t_{BX} = 23,1$ °C; | $\Delta t = 0$ °C; | $X=0,420$; |
| 4) $q=250,0$ кВт/м ² ; | $p=627,5$ кПа; | $t_{BX} = 23,5$ °C; | $\Delta t = 0$ °C; | $X=0,555$ |

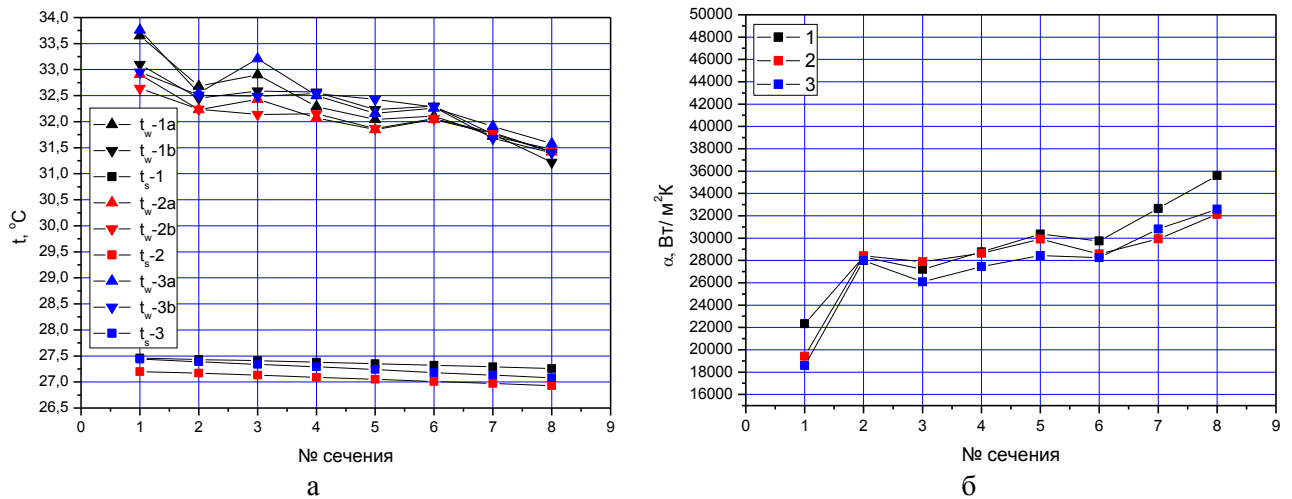


Рисунок 9. а) температурные поля стенки рабочего участка (сечение 0° - a ; 270° - b) и температуры потока; б) локальные значения коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента R134a в канале со вставленной скрученной лентой $y=3$ при $q=const=145$ кВт/м²:

- | | | | | |
|---------------------|----------------|---------------------|------------------------|-------------|
| 1) $Re_0=31294,5$; | $p=620,2$ кПа; | $t_{ax} = 23,9$ °C; | $\Delta t = -0,59$ °C; | $X=0,315$; |
| 2) $Re_0=45308,7$; | $p=611,5$ кПа; | $t_{ax} = 23,4$ °C; | $\Delta t = -1,84$ °C; | $X=0,203$; |
| 3) $Re_0=63471,0$; | $p=618,2$ кПа; | $t_{ax} = 24,2$ °C; | $\Delta t = -1,83$ °C; | $X=0,144$ |



Рисунок 10. Фотография кольцевого режима течения при кипении хладагента R134a в трубе со вставленными гладкими скрученными лентами

Определяющее влияние на теплоотдачу, оказывает плотность теплового потока q . Рост теплоотдачи в каналах со вставленной скрученной лентой относительно прямолинейного канала без вставок в среднем составляет для $y=3$ до 1,61; $y=4$ до 1,51; $y=6$ до 1,42.

В работах (Kanizawa F.T., Mogaji T.S., Akhavan-Behabadi M.A., Минеев Ю.В., Agrawal K.N.) отмечено, что проявление влияния скорости потока при кипении хладагентов в каналах со вставленной скрученной лентой наступает при числах Рейнольдса $Re_0 < 17000$ ($\rho_w = 32 \div 150$), и по разным данным находится в степени от 0,33 до 2,247. Важно заметить, что данные результаты были получены и при меньших плотностях теплового потока $q < 50$ кВт/м², в отличие от данных работ, результаты полученные в настоящей диссертационной работе

существенно превышают диапазон режимных параметров от полученных ранее.

Как уже было, отмечено большое влияние на изменение теплоотдачи оказывает тепловая нагрузка (показатель степени при которой в экспериментах близок к значению 0,7) подводимая к рабочему участку, которая может быть учтена с помощью параметра кипения Bo . В связи с тем, что в оба числа подобия $Re_0 = \frac{\rho w d}{\mu}$

$Bo = \frac{q}{r \rho w}$ входит массовая скорость ρw , было решено использовать единый комплекс, модифицированное число $Re_* = Bo \cdot Re_0 = \frac{q d}{\mu r}$ для учета влияния режимных параметров. Данный комплекс характеризует интенсивность перемешивания жидкости из-за движения пузырей. Так как в процессе экспериментального исследования

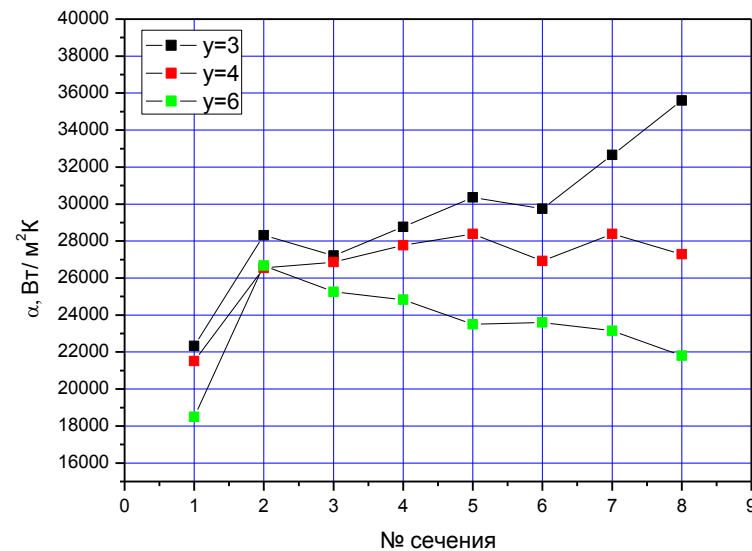


Рисунок 11. Локальные значения коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставленными скрученными лентами с различными относительными шагами закрутки при: $Re_0 = const = 31200$, $q = const = 145$ кВт/м²

давление и теплофизические свойства жидкости менялись не значительно, то учет влияния давления на теплоотдачу производился с помощью комплекса K_p , показатель степени был принят равным 0,2, согласно данным работ (Боришанский В.М., Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г., Минеев Ю.В.), а теплофизические свойства учитывались числом Pr в степени 0,43 (Минеев Ю.В.). Критериальная зависимость с учетом вышеизложенного может быть представлена в следующем виде: $Nu = C Re_*^m (s/d)^n K_p^{0,2} Pr^{0,43}$.

Окончательная зависимость, описывающая экспериментальные данные по теплоотдаче при кипении хладагента R134a в канале с гладкими скрученными лентами имеет вид:

$$Nu = 10,33 Re_*^{0,7} K_p^{0,2} (s/d)^{-0,15} Pr^{0,43} \quad (3)$$

Зависимость (3) справедлива для расчета теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставленными скрученными лентами с относительным шагом закрутки $s/d = 3 \div 6$; в диапазоне режимных параметров: число Рейнольдса по скорости циркуляции жидкости $Re_0 = 30000 \div 85000$, плотность теплового потока $q = 99 \div 250$ кВт/м², максимальное отклонение экспериментальных данных от рассчитанных по полученной зависимости (3) составляет $\pm 15\%$ при доверительной вероятности 0,95.

Оценка влияния режимных параметров на теплоотдачу при кипении хладагента R134a в канале со вставленными оребренными скрученными лентами показала, что влияние числа Рейнольдса Re_0 , плотности теплового потока q , и относительного шага закрутки $y = s/d$ в

каналах со вставленными скрученными лентами, аналогично тому, которое было выявлено в каналах с гладкими скрученными лентами.

Теплоотдача незначительно увеличивается с уменьшением безразмерного шага в области от $t/s=1$ до $t/s>1$, и снижается при дальнейшем уменьшении безразмерного шага при $t/s<1$. Снижение теплоотдачи с самым плотным шагом установки ребер $t=20$ мм связано, с изменением структуры течения, а именно с образованием застойных зон на поверхности канала, за точкой контакта торца ребра со стенкой канала. При снижении числа Рейнольдса ниже $4,5 \cdot 10^4$ визуально зафиксировано образование устойчивого сухого пятна в данной области (рисунок 12). При дальнейшем увеличении плотности теплового потока свыше $q>222,9$ кВт/м² происходит кризис теплообмена, сопровождающимся резким повышением температуры стенки канала, с последующим разрушением канала.

На рисунке 12 визуально зафиксирован режим течения в канале с оребренной скрученной лентой $y=4$, с шагом установки ребра $t=20$ мм на границе начала кризиса теплоотдачи. Локальные значения теплоотдачи по длине рабочего участка на границе кризиса представлены на рисунке 13. Кризис теплообмена находится в сечении №5, о чем свидетельствует снижение коэффициента теплоотдачи еще до начала кризиса, с наступлением кризиса температура стенки резко повышается более чем на 200 °С в данном сечении, с последующим ростом в остальных сечениях.

Результаты экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении хладагента R134a в канале со вставленными оребренными скрученными лентами приведены на рисунке 14. Как видно из графика, влияние шага установки ребер на поверхности скрученной ленты на теплоотдачу при различных относительных шагах закрутки качественно не отличается от сделанных ранее выводов, что в области от $t/s=1$ до $t/s>1$ происходит увеличение теплоотдачи, при шаге $t/s<1$ наблюдается снижение теплоотдачи до уровня гладких скрученных лент.

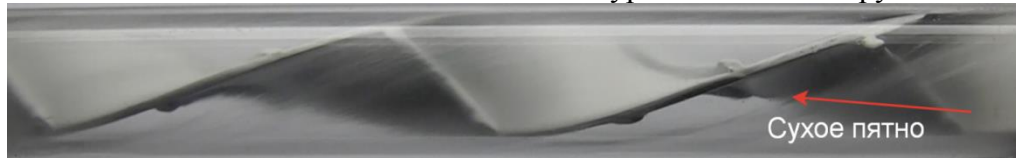


Рисунок 12. Фотография режима течения в канале со скрученной лентой $y=4$, с шагом установки ребра $t=20$ мм при: $Re_0=31459,8$; $q=222,9$ кВт/м²; $p=627,9$ кПа; $t_{вх}=23,6$ °С; $X=0,488$

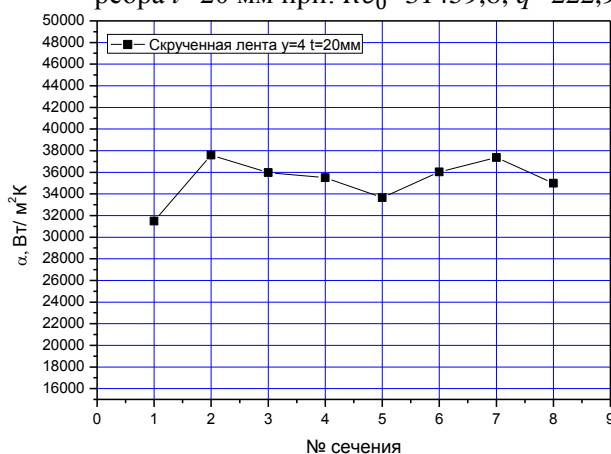


Рисунок 13. Локальные значения коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента R134a в канале со скрученной лентой $y=4$, с шагом установки ребра $t=20$ мм при: $Re_0=31459,8$; $q=222,9$ кВт/м²; $p=627,9$ кПа; $t_{вх}=23,6$ °С; $X=0,488$

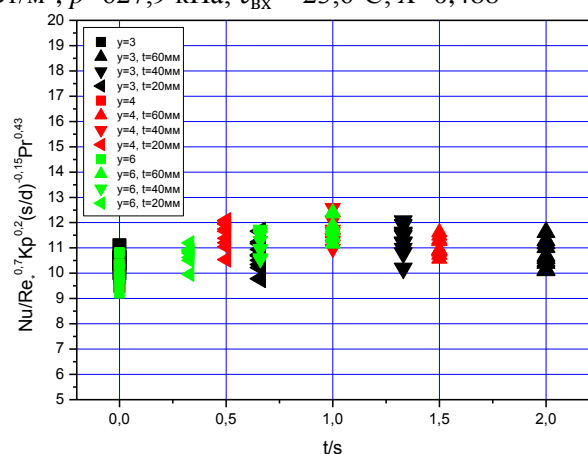


Рисунок 14. Теплоотдача при кипении хладагента R134a в канале с оребренными скрученными лентами $y=3$; 4; 6 с шагами установки ребер $t=60$; 40; 20 мм

Наличие ребер не значительно влияет на теплоотдачу при кипении, однако установка ребер изменяет структуру течения. Установка ребер на поверхности приводит к увеличению количества пара внутри канала, за счет образования вихревых структур за ребром, в которых

происходит активное парообразование, а также из-за снижения температуры насыщения жидкости вследствие увеличения гидравлического сопротивления. Увеличение паросодержания при прочих равных режимных параметрах в каналах с оребренными скрученными лентами приводит к более раннему началу кризиса теплообмена, чем в каналах со вставленными гладкими скрученными лентами, из-за возникновения сухих пятен на теплоотдающей поверхности.

Как было отмечено выше, при кипении хладагента в каналах со вставленной скрученной лентой $y=4$ с шагом установки ребер $t=20$ мм было зафиксировано образование застойных зон с уменьшением толщины пленки жидкости и образование устойчивого сухого пятна за точкой контакта торца ребра со стенкой канала при снижении числа Рейнольдса $Re_0 < 4,5 \cdot 10^4$, в канале со вставленной скрученной лентой $y=6$ с шагом установки ребер $t=20$ мм наблюдается аналогичная картина режима течения с образованием устойчивого сухого пятна в данной области. При увеличении числа $Re_0 > 4,5 \cdot 10^4$ происходит натекание жидкости, с кратковременным смачиванием поверхности тонкой пленкой жидкости, и образованием разрывов пленки жидкости в зоне контакта торца ребра со стенкой канала. Течение пленки жидкости на поверхности стенки в канале со оребренной скрученной лентой $y=6$ и $t=20$ мм, менее равномерное, чем в канале с лентой $y=4$ и $t=20$ мм.

Граница начала кризиса теплоотдачи в канале с оребренной лентой с относительным шагом закрутки $y=6$ и шагом установки ребер $t=20$ мм находится ниже, чем для $y=4$ и $t=20$ мм, и соответствует плотности теплового потока $q \geq 161,8$ кВт/м². Локальные значения теплоотдачи по длине рабочего участка на границе кризиса теплоотдачи в канале со скрученной лентой $y=6$ и шагом установки ребер $t=20$ мм представлены на рисунке 15.

Достигнуть критических тепловых нагрузок в канале с оребренной скрученной лентой $y=3$ с шагом установки ребер $t=20$ мм не удалось, даже при максимально возможной мощности трансформатора.

Наблюдалось, что за счет установленных ребер на поверхности происходит увеличение парообразования внутри канала, за счет образования вихревых структур за ребром, в которых происходит активное парообразование. Отмечено, что с уменьшением относительного шага закрутки ленты происходит более равномерное распределение жидкости на теплообменной поверхности за счет возрастания массовых сил, в результате которого происходит увеличение критических тепловых потоков.

Важным является факт, что в данном канале во всем исследуемом диапазоне отсутствуют сухие пятна, не наблюдалось разрывов пленки жидкости на теплоотдающей поверхности и в зоне контакта торцов ребер со стенкой канала. Распределение жидкости на теплоотдающей поверхности в канале с оребренной лентой $y=3$ и $t=20$ мм, более равномерное, чем с лентой $y=4$ и $t=20$ мм, о чем свидетельствуют более высокие коэффициенты теплоотдачи. Локальные значения теплоотдачи по длине рабочего участка при максимальной возможной плотности теплового потока $q=326,5$ кВт/м² в канале со скрученной лентой $y=6$ и шагом установки ребер $t=20$ мм представлены на рисунке 16.

Исходя из представленных данных о режимах течения в каналах с оребренными скрученными лентами при кипении хладагента R134a, можно заключить, что установка ребер не значительно влияет на теплоотдачу при кипении. Установка ребер с наименьшим шагом $t=20$ мм при числах $Re_0 < 4,5 \cdot 10^4$ в каналах с относительным шагом закрутки $y > 4$ приводит к образованию застойных зон, способствующих образованию сухих пятен, вследствие чего кризис теплоотдачи наступает раньше, чем в каналах с гладкими скрученными лентами. Это еще раз подтверждает данные работы В.И. Субботина, что максимальный эффект от закрутки наблюдается при s/d меньше 4.

Увеличение коэффициента теплоотдачи в каналах со вставленными оребренными скрученными лентами в исследуемом диапазоне геометрических параметров относительно прямолинейного канала при кипении в среднем составляет от 1,52 до 1,75 раз.

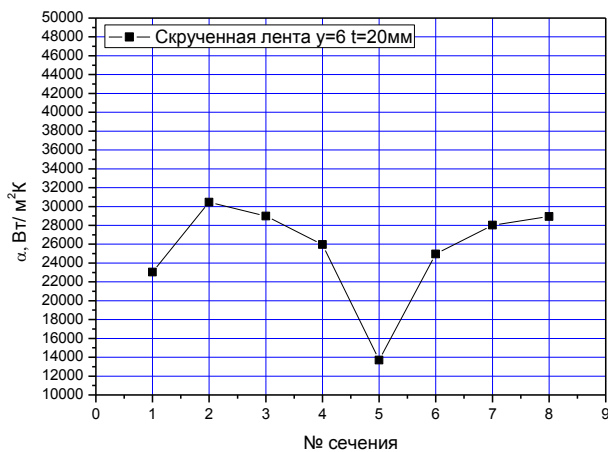


Рисунок 15. Локальные значения коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента R134a в канале со скрученной лентой $y=6$, с шагом установки ребра $t=20\text{мм}$ при: $Re_0=32462,5$; $q=161,8 \text{ кВт/м}^2$; $p=618,4 \text{ кПа}$; $t_{\text{вх}}=23,0^\circ\text{C}$; $X=0,330$

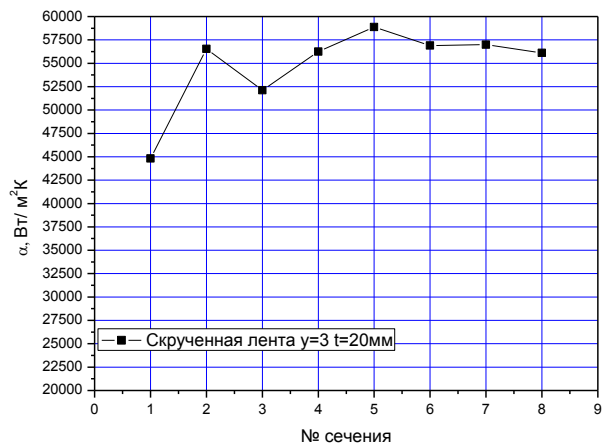


Рисунок 16. Локальные значения коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента R134a в канале со скрученной лентой $y=3$, с шагом установки ребра $t=20\text{мм}$ при: $Re_0=31433,1$; $q=326,5 \text{ кВт/м}^2$; $t_{\text{вх}}=24,3^\circ\text{C}$; $X=0,740$; $p=661,4 \text{ кПа}$

Коэффициент теплоотдачи со вставленными оребренными скрученными лентами может быть рассчитан по зависимости (3) с погрешностью $\pm 22\%$ при доверительной вероятности 0,95.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан и создан уникальный автоматизированный экспериментальный стенд для исследования теплогидравлических характеристик одно- и двухфазного течения хладагента R134a в различных каналах с электрическим нагревом, оснащенный современной измерительной системой National Instruments со скоростью опроса, обработки и записи экспериментальных данных в файл равной 3,081 мс, с одновременной видеофиксацией режима течения непосредственно на выходе из рабочего участка. Экспериментальный стенд позволяет проводить эксперименты в широком диапазоне режимных параметров массового расхода хладагента до 0.5 кг/с, плотности теплового потока на участке q до 0.35 МВт/м², обеспечивая высокий контроль и стабилизацию заданных параметров.

2. При визуализации режимов течения в каналах со вставленными скрученными лентами при кипении хладагента R134a в реальных условиях теплообменного оборудования зафиксирован шнуровидный режим течения. Ранее такой режим течения наблюдался только при адиабатных (водо-воздушных) течениях. Таким образом, впервые визуально подтверждено наличие шнуровидного течения жидкости на оси скрученной ленты в условиях теплообмена.

3. На основе экспериментального исследования установлено, что при расчете коэффициента теплоотдачи в каналах со вставленными гладкими и оребренными скрученными лентами при вынужденной конвекции R134a можно использовать зависимости Манглика-Берглеса и А.А. Гиниятуллина полученные для воды. Максимальное отклонение экспериментальных данных от значений, рассчитанных по данным зависимостям составляет не более 17,6%.

4. Изучено влияние режимных параметров на теплоотдачу при кипении хладагента R134a в каналах со вставленными скрученными лентами. Отмечено, что большее влияние на изменение теплоотдачи оказывает тепловая нагрузка, подводимая к рабочему участку, влияния числа Рейнольдса в диапазоне значений $Re_0=(3,1\div 8,3)\cdot 10^4$ не обнаружено. Увеличение коэффициента теплоотдачи происходит с уменьшением относительного шага закрутки, в следствии возрастающего воздействия массовых сил. Интенсификация теплоотдачи в каналах со вставленной скрученной лентой относительно прямолинейного канала без вставок в среднем составляет для $y=3$ до 1,61; $y=4$ до 1,51; $y=6$ до 1,42.

5. Получена обобщающая зависимость для расчета теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставленными гладкими скрученными лентами с относительным шагом закрутки $s/d=3\div 6$; в диапазоне режимных параметров: число Рейнольдса по скорости циркуляции жидкости $Re_0=30000\div 85000$, плотность теплового потока $q=99\div 250$ кВт/м², параметр кипения $Bo=0,00052\div 0,00338$. Максимальное отклонение экспериментальных данных от рассчитанных по полученной зависимости составляет $\pm 15\%$ при доверительной вероятности 0,95. Данная зависимость рекомендуется для инженерных расчетов при проектировании теплообменного оборудования с использованием оребренных лент.

6. Установлено, что влияние режимных параметров на теплоотдачу при кипении хладагента R134a в канале со вставленными оребренными скрученными лентами, аналогично тому, которое было выявлено в каналах с гладкими скрученными лентами. За счет установленных ребер на поверхности происходит увеличение парообразования внутри канала, в следствии образования вихревых структур за ребром, в которых происходит активное парообразование. Установка ребер не значительно влияет на теплоотдачу при кипении, однако установка ребер изменяет структуру течения, увеличивает количество пара, дополнительной генерацией пара внутри канала при снижении температуры насыщения жидкости в следствии увеличения гидравлического сопротивления. Увеличение паросожержания при прочих равных режимных параметрах в каналах с оребренными скрученными лентами приводит к более раннему началу кризиса теплообмена, чем в каналах со вставленными гладкими скрученными лентами, из-за возникновения сухих пятен на теплоотдающей поверхности. Увеличение коэффициента теплоотдачи в каналах со вставленными оребренными скрученными лентами в исследуемом диапазоне геометрических параметров относительно прямолинейного канала при кипении в среднем составляет от 1,52 до 1,75 раз.

7. Отмечено, что с уменьшением относительного шага закрутки ленты происходит более равномерное распределение жидкости на теплообменной поверхности под действием массовых сил, в результате которого происходит увеличение критических тепловых потоков. Максимальный эффект от закрутки наблюдается при s/d меньше 4.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

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

1. *Шишкин А.В.* Особенности тепломассобмена в трубах с различными закручивающими ленточными вставками / С.Э. Тарасевич, А.Б. Яковлев, А.А. Гиниятуллин, А.В. Шишкин // Тепловые процессы в технике. – М., 2011. – №3. – С.133-139.

2. *Шишкин А.В.* Структура адиабатных двухфазных течений в различных каналах с закруткой потока при низких давлениях / С.Э. Тарасевич, А.Б. Яковлев, А.В. Шишкин // Тепловые процессы в технике. – М., 2012. – №11. – С.510-522.

3. *Шишкин А.В.* Стенд для экспериментального исследования фреонов в различных каналах / С.Э. Тарасевич, А.В. Шишкин, А.Б. Яковлев // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2013. – № 2. – С.60-62.

4. *Шишкин А.В.* Теплоотдача при течении хладагента R134a в трубах со скрученными ленточными вставками / С.Э. Тарасевич, А.В. Шишкин, А.Б. Яковлев // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2015. – № 4. – С.25-30.

Научная статья, опубликованная в рецензируемом научном издании, определенном Web of Science:

1. *Shishkin A.V.* Hydrodynamics and heat transfer in tubes with smooth and ribbed twisted tape inserts / S.E. Tarasevich, A.B. Yakovlev, A.A. Giniyatullin, A.V. Shishkin // Journal of Enhanced Heat Transfer. – 2013. – 20(6). – P.511-518.

Публикации в других изданиях и материалах конференций

В период 2008-2016 гг. опубликовано 18 тезисов и материалов доклада, основные:

1. *Shishkin A.V.* Structure of an adiabatic two-phase twisted flow in various channels / A.V. Shishkin, S.E. Tarasevich, A.B. Yakovlev // Proceedings of the 15th International Symposium on Flow Visualization ISFV15, Minsk, Belarus, 2012, Paper ISFV15-075-S12, 10 p.

2. *Shishkin A.V.* Structure of Two-Phase Swirl Flow in Various Channels / A.B. Yakovlev, S.E. Tarasevich, A.V. Shishkin // Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference, IHTC-15, Kyoto, Japan, 2014, Paper IHTC15-8927, 10 p.

3. *Shishkin A.V.* Heat and mass transfer in tubes with various twisted tape inserts / S.E. Tarasevich, A.B. Yakovlev, A.A. Giniyatullin, A.V. Shishkin // Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE 2011, November 11-17, 2011. – Denver, Colorado, USA, 2011. – P.697-702.

4. *Шишкин А.В.* Особенности теплообмена в каналах с оребренными скрученными лентами / С.Э. Тарасевич, А.Б. Яковлев, А.А. Гиниятуллин, А.В. Шишкин // XIV Минский международный форум по теплообмену. – Минск, 2012. – С.294-296.

5. *Шишкин А.В.* Кипение фреона R134a в трубах с закрученными ленточными вставками / С.Э. Тарасевич, А.В. Шишкин, А.Б. Яковлев // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Пятая международная конференция, Казань. Тезисы докладов. — Санкт-Петербург: «Свое издательство», 2015. – С. 54-55.

6. *Шишкин А.В.* Конвективный теплообмен в канале с интенсифицированной скрученной лентой / А.А. Гиниятуллин, С.Э. Тарасевич, А.В. Шишкин, А.Б. Яковлев // Тезисы докладов и сообщений XV Минского международного форума по тепло- и массообмену, Минск, Белоруссия, 2016, Т.1. – С.57-60.

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

8. *Шишкин А.В.* Особенности теплообмена в каналах с оребренными скрученными лентами / С.Э. Тарасевич, А.Б. Яковлев, А.А. Гиниятуллин, А.В. Шишкин // VIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. Россия, Казань 16-18 октября 2012 г. – Казань, 2012. – С.70-73.

9. *Шишкин А.В.* Особенности течений и теплообмена в каналах с различными закручивающими вставками / С.Э. Тарасевич, Г.К. Ильин, А.Б. Яковлев, А.В. Шишкин // Современная наука: сборник научных статей. – Киев. НПВК Триакон, 2010. – №2. – С.206-210.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100. Заказ А33

Издательство КНИТУ-КАИ
420111, Казань, К.Маркса, 10