

На правах рукописи



Миронов Александр Александрович

**ТЕПЛООБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА ПРИ ТЕЧЕНИИ
ОДНОФАЗНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ
С ПОВЕРХНОСТНЫМИ ВИХРЕГЕНЕРАТОРАМИ
РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ**

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань - 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» на кафедре теплотехники и энергетического машиностроения.

- Научный руководитель -** доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»
Попов Игорь Александрович
- Официальные оппоненты:** **Терехов Виктор Иванович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории термогазодинамики ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН», заслуженный деятель науки РФ, г. Новосибирск
Плотников Леонид Валерьевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры турбин и двигателей ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург
- Ведущая организация -** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 16 января 2025 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.310.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд.Д-224, тел.: (843)519-42-58.

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.03, Svetlana-zag@bk.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на сайте <https://kgeu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Борисова Светлана Дмитриевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Вся тепловая энергия с момента получения в теплогенерирующей установке до своего использования проходит 2-4 раза преобразования в различных теплообменных аппаратах и теплотехнологических установках. От эффективности этих теплотехнических установок зависит энергоемкость производства подавляющего количества продукции. Задача повышения эффективности теплотехнических установок удачно решается использованием интенсификации теплоотдачи, которая не только позволяет сократить энергопотребление, но и снизить металлоемкость и повысить надежность теплотехнических установок.

В последние 15-20 лет проведены обширные исследования вихревой интенсификации теплоотдачи с использованием симметричных и асимметричных сферических выемок. Сегодня сформирована база данных по сопротивлениям и теплоотдаче каналов с различными геометриями расположения сферических выемок, установлены и описаны механизмы и уровни интенсификации, даны рекомендации по прогнозированию коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления, разработаны, созданы и испытаны образцы теплообменного оборудования с данными интенсификаторами. Однако были выявлены существенные недостатки данной формы поверхностного интенсификатора. Основное направление исследований на данном этапе исследований - поиск рациональных форм интенсификаторов. Работы по поиску формы, обеспечивающей сопоставимый, а желательно опережающий прирост теплоотдачи по сравнению с гидравлическим сопротивлением, вызывают огромный интерес у производителей и потребителей теплообменного оборудования и ставят данный вопрос перед исследователями. Здесь необходим комплексный выбор формы выемок, шага между выемками и взаимного расположения к потоку, обеспечивающие максимальную интенсификацию теплоотдачи при умеренном росте гидравлического сопротивления. В настоящее время практически отсутствуют рекомендации по прогнозированию коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления для каналов с перспективными типами вихрегенераторов. Данная работа направлена на экспериментальное исследование теплоотдачи и гидравлического сопротивления в каналах с отдельными видами поверхностных интенсификаторов теплообмена. Использование в работе численного эксперимента позволило детально оценить влияние различных режимных (режимов обтекания, внешних и начальных условий, теплофизических свойств теплоносителей и т.д.) и конструктивных (размеры, форма и расположение выемок, влияние формы каналов и т.д.) параметров и выявить рациональные значения данных параметров с точки зрения теплогидравлической эффективности.

Степень разработанности: В работе проведен критический анализ многочисленных работ по исследованиям гидродинамики и теплообмена на поверхностях теплообменного оборудования с поверхностными вихрегенераторами в виде выемок различной формы, в том числе приведенных в работах Г.И. Кикнадзе, А.И. Леонтьева, Я.П. Чудновского, В.И. Терехова, С.А. Исаева, В. Sundén, А.П. Козлова, А.А. Халатова, А.В. Щукина, Г.П. Нагоги, Ю.М. Анурова, Р.М. Ligrani, Ю.Ф. Гортышова, И.А. Попова, М.А. Готовского, Ю.И. Шанина, А.В. Воскобойника, С.З. Сапожникова, А.А. Цынаевой, Н.И. Михеева, А.В. Щелчкова, С.А. Бурцева, S.D. Hwang и многих других. Также уделено внимание практическому использованию результатов исследований в теплотехнологических и теплоэнергетических устройствах.

Предмет исследования - гидравлическое сопротивление и теплоотдача в каналах с поверхностными интенсификаторами в условиях вынужденной конвекции.

Объект исследования - способ интенсификации теплоотдачи за счет применения систем выемок в виде овально-траншейных, овально-дуговых выемок и выемок в форме бумеранга.

Цель работы - разработка рекомендаций для прогнозирования теплоотдачи и гидравлического сопротивления при вынужденной конвекции теплоносителя в щелевых

каналах с поверхностными вихревыми интенсификаторами на основе комплексного экспериментального и численного исследования.

Задачи исследования:

1. Провести критический анализ имеющихся на сегодняшний день научных публикаций, посвященных экспериментальному моделированию процесса интенсификации теплоотдачи с использованием овально-траншейных выемок в условиях вынужденной конвекции; сформировать базу данных величин коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления; обосновать выбор и характерные диапазоны влияния определяющих безразмерных геометрических симплексов и режимных параметров потока.

2. Выполнить экспериментальное исследование гидравлического сопротивления и теплоотдачи в условиях вынужденной конвекции в щелевых каналах с поверхностными вихрегенераторами для определения зависимости величин коэффициентов теплоотдачи и сопротивления от режимных параметров.

3. Выполнить экспериментальное исследование распределения локальных температур и визуализацию течения для обоснования механизмов интенсификации теплоотдачи.

4. Провести верификацию результатов численных исследований С.А.Исаева по поверхностным вихревым интенсификаторам на основе полученных экспериментальных данных.

5. Провести численное исследование теплоотдачи и гидравлического сопротивления в каналах с поверхностными интенсификаторами нового типа.

6. Разработать рекомендации для прогнозирования уровня интенсификации теплоотдачи и повышения коэффициентов гидравлического сопротивления в условиях вынужденной конвекции в щелевых каналах на основе нейросетевого и регрессионного анализов процесса интенсификации теплообмена, с последующим обоснованием основных рациональных размеров рельефа.

Научная новизна:

1. Предложены и запатентованы новые формы поверхностных интенсификаторов в виде овально-траншейных, овально-дуговых выемок и выемок в форме бумеранга, а также рациональные размеры интенсификаторов для турбулентного режима течения;

2. Выполнено экспериментальное исследование картин течения, гидравлического сопротивления и теплоотдачи в условиях вынужденной конвекции в щелевых каналах с поверхностными вихрегенераторами в виде различных компоновок систем овально-траншейных и овально-дуговых выемок;

3. Впервые определены зависимости величин коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления от режимных и геометрических параметров для однорядных систем овально-траншейных выемок;

4. Проведена верификация результатов численных исследований С.А.Исаева по поверхностным вихревым интенсификаторам на основе полученных экспериментальных данных;

5. Проведено численное исследование теплоотдачи и гидравлического сопротивления в каналах с поверхностным интенсификатором нового типа – в виде бумеранга;

6. Разработаны рекомендации для прогнозирования уровня интенсификации теплоотдачи и повышения коэффициентов гидравлического сопротивления в условиях вынужденной конвекции в щелевых каналах на основе нейросетевого и регрессионного анализов процесса интенсификации теплообмена.

Полученные результаты имеют теоретическую значимость:

1. Получены новые сведения о гидродинамике и теплоотдаче в каналах с системами выемок различных форм в условиях вынужденной конвекции.

2. Представлен новый подход к прогнозированию значений коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления в зависимости от геометрических параметров поверхности с использованием искусственной нейронной сети.

3. Проведена верификация ранее выполненных численных исследований С.А.Исаева по

гидродинамике и теплообмену в каналах с различными типами вихрегенераторов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

Разработаны новые рекомендации по выбору рациональных геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена, позволяющие производить расчет и проектирование систем охлаждения энергетического оборудования и теплообменных аппаратов.

Работа выполнена в рамках реализации проектов по соглашению с Министерством высшего образования и науки РФ № 14.Z50.31.0003, 075-03-2020-051/3, 075-03-2023-032, РФФИ №18-38-00356, 20-58-04002.

Методология и методы исследования - оценка влияния геометрических параметров поверхностных вихрегенераторов и режимных параметров рабочей жидкости на теплоотдачу в условиях вынужденной конвекции производилась путем проведения экспериментального исследования. Экспериментальное исследование производилось в условиях вынужденной конвекции, с аттестованными приборами измерения температуры, давления, расхода, напряжения и силы тока. Подвод тепла к рабочим поверхностям осуществлялся калориметрическим путем. Оценка неопределенности измерения коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления осуществлялась по ГОСТ-34100-1-2017. Геометрические параметры исследуемых поверхностей определялись с использованием стереомикроскопа с цифровой камерой. Обработка экспериментальных данных и их обобщение производилось в программе Origin, построение нейронной сети производилось в программном комплексе Matlab, а численное моделирование – в пакете прикладных программ VP2/3.

Положения, выносимые на защиту:

1) Результаты исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления в щелевых каналах с различными типами поверхностных интенсификаторов в условиях вынужденной конвекции.

2) Выбор и обоснование основных рациональных размеров рельефа поверхностей каналов с различными типами поверхностных интенсификаторов.

3) Универсальные рекомендации по расчету значений коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления каналов с различными типами поверхностных интенсификаторов в условиях вынужденной конвекции, полученные на основе регрессионного и нейросетевого моделирования.

Достоверность представленных результатов исследования обеспечивается:

1) Применением сертифицированного и тарированного оборудования и средств измерения с соответствующим уровнем точности.

2) Оценкой неопределенности, что позволяет сравнивать полученные данные с данными других авторов.

3) Использованием современных программных комплексов и компьютерных технологий и техники для обработки и прогнозирования данных.

Апробация результатов и публикации:

По теме диссертационной работы опубликовано 32 работы, из них 5 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации, 4 - в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS, 1 - в международном рецензируемом научном журнале, 19 – в материалах докладов на международных и всероссийских конференциях, 3 патента РФ на изобретения. Отдельные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на X Международной теплофизической школе «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий» (Душанбе, 2016), X школе-семинаре под руководством акад. РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (Казань, 2016), школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (СПб, 2017), XXXIII, XXXVI, XXXVII и XL Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2017, 2020, 2021, 2024), II и III Международной конференции «Современные проблемы теплоэнергетики и теплофизики» (Москва, 2017,

2020), международной конференции «Гидродинамика и теплообмен в закрученных потоках» (Новосибирск, 2017), Международной конференции «Информационно-сенсорные системы в теплофизических исследованиях» (Тамбов, 2018), XXV и XXVI Международной конференции «Туполевские чтения» (Казань, 2021, 2023), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли» (Казань, 2018), VII и VIII Российских национальных конференциях по теплообмену (Москва, 2018, 2022), XII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов с международным участием «Будущее машиностроения России» (Москва, 2019), XVI Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, 2022).

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника» по пунктам паспорта: 4 – «Процессы переноса массы, импульса и энергии при свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей и характеристик теплопередающих поверхностей, в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях»; 5 – «Научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты».

Личный вклад. Постановка цели и задач исследования сформулированы автором совместно с руководителем. При анализе и обобщении данных по гидравлическому сопротивлению и теплоотдаче совместно использованы данные исследований автора и С.А. Исаева, заимствованные из открытой научной литературы с соответствующими ссылками. Автором лично проведен критический анализ описанных в литературе экспериментальных исследований процессов интенсификации теплоотдачи; получены рекомендации и обобщающие зависимости для расчета величин коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления; разработан алгоритм и программа на основе применения искусственных нейронных сетей; предложены рациональные параметры поверхностей с различными типами вихрегенераторов. Поверхности с вихрегенераторами изготовлены автором. При содействии С.А. Исаева проведено обучение технике использования вычислительных технологий и постановка численных исследований. Численные исследования и их анализ проведен автором самостоятельно.

Объем и структура диссертационной работы: Общий объем диссертационного исследования составляет 179 страницы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка источников используемой литературы в количестве 166 наименований, приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проводимых в рамках данной диссертационной работы исследований, определяются основные задачи исследований, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава содержит критический анализ публикаций по теплоотдаче и гидравлического сопротивления на поверхностях и в каналах с поверхностными трехмерными вихревыми интенсификаторами.

В ходе критического анализа литературных источников установлено, что:

1) исследованы механизмы интенсификации теплообмена на поверхностях со сферическими выемками. Однако критический анализ показал, что их использование несмотря на высокую теплогидравлическую эффективность сопряжено со значительным ростом гидравлического сопротивления;

2) в настоящее время основное направление исследований поверхностных интенсификаторов – поиск новых геометрий вихревых интенсификаторов, обеспечивающих умеренный рост сопротивления при сохранении высокого уровня теплогидравлической эффективности. Прорыв осуществлен при переходе к вихрегенераторам с моновихревыми структурами течения в них и исключения пульсаций и переключений выбросов массы из вихрегенераторов;

3) исследователями предложен достаточно большой спектр новых геометрий вихревых интенсификаторов. Однако в литературе крайне мало конкретных рекомендаций по их

рациональным геометрическим параметрам, обеспечивающих максимальные значения тепловой или теплогидравлической эффективности и отсутствуют конкретные рекомендации по расчетной оценке уровней теплоотдачи и гидравлических потерь;

4) численные методы исследований являются основным, простым и дешевым инструментом при поисковых исследованиях новых типов интенсификаторов теплообмена, поиска рациональных форм и геометрических параметров интенсификаторов, однако все результаты численных исследований требуют скрупулезной валидации и верификации на основе результатов экспериментальных исследований;

5) практическое использование поверхностных вихревых интенсификаторов в технических приложениях носит случайный характер при выборе рациональных геометрических параметров интенсификаторов.

По результатам критического анализа сформулирована цель и основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию комплекса экспериментальных стендов, методик проведения и обработки экспериментов, оценки неопределенности измерений, результатов тестовых экспериментов.

Создан и использован экспериментальный водопроливной стенд (рис.1) для проведения высокоскоростной визуализации течения в каналах с поверхностными интенсификаторами, который представляет собой водный замкнутый контур с принудительной системой подачи воды к рабочему участку. Кроме визуализации течений на стенде производилось измерение гидравлических сопротивлений каналов с поверхностными интенсификаторами.

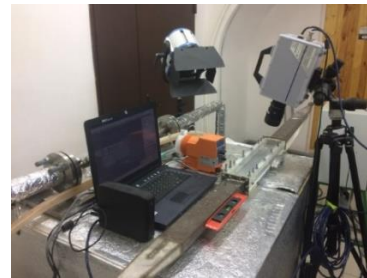
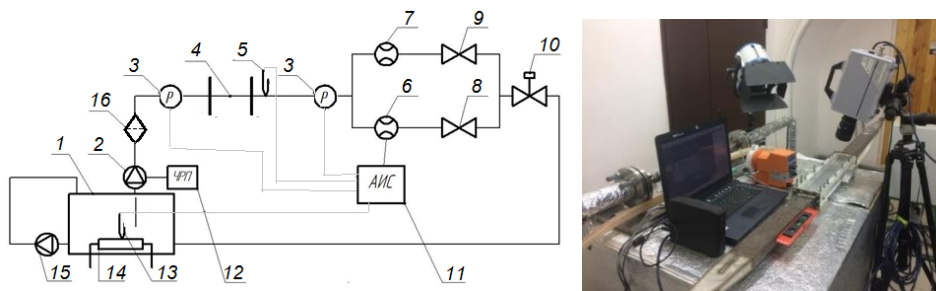


Рис.1. Схема экспериментального водопроливного стенда: 1 – бак-нагреватель; 2 - центробежный насос; 3 - датчик давления; 4 - рабочий участок; 5, 13 - датчики температуры; 6, 7 - электромагнитные расходомеры; 8, 9 - запорные клапаны; 10 - регулируемый вентиль; 11 - АИС; 12 - ЧРП; 14 - ТЭН; 15 - циркуляционный насос, 16 - фильтр

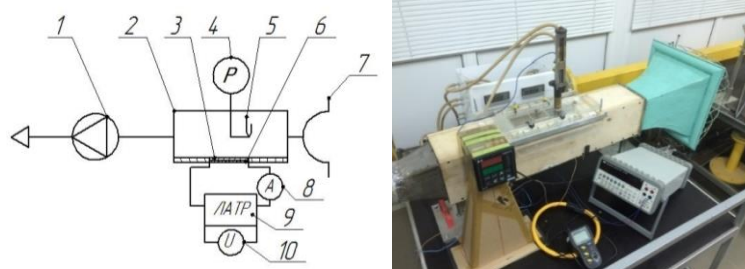


Рис.2. Схема рабочей установки: 1 - ВДН; 2 - рабочий канал; 3 - нагреваемая интенсифицированная металлическая пластина; 4 - трубка Пито - Прандтля; 5 - термопара; 6 - нагреватель; 7 - входное устройство (сопло Витошинского); 8 – токоизмерительные клещи; 9 - ЛАТР; 10 – мультиметр.

Для проведения визуализации температурных полей при обтекании вихрегенераторов разработан и создан экспериментальный стенд, представляющий собой воздушную магистраль, работающую на всасывание и состоящую из следующих частей: вентилятор дутьевой одностороннего всасывания ВДН, всасывающая магистраль, систему измерений, а также сам рабочий канал сечением 98×98 мм. Схема экспериментального стенда представлена на рис.2.

Основная часть экспериментальных исследований гидродинамики и теплоотдачи в каналах с вихрегенераторами проводилась на экспериментальном воздушном напорном стенде, представленном на рис.3.



Рис.3. Схема экспериментального стенда: 1-3 – компрессор; 4-6, 13 - клапан электромагнитный двухпозиционный пилотного действия; 7 - фильтрационный модуль для очистки сжатого воздуха; 8 - осушитель; 9, 11 - вентили; 10,12 - ресиверы; 14 - шаровый кран с электроприводом; 15 - шаровый кран с электроприводом для перепуска; 16 - ультразвуковой расходомер-счетчик газа; 17 - нагреватель; 18 - источник энергии для нагревателя; 19 - рабочий участок; 20 - контроллер; 21 - щиток для управления клапанами 4-6, 13

Рабочий участок представляет собой щелевой канал со сменной интенсифицированной пластиной, пред- и постучастком длиной 50 калибров от эквивалентного диаметра канала. Стенка канала рабочего участка нагревалась за счет электрического сопротивления металлической пленочной подложки. Для исследования гидравлического сопротивления в крышке рабочего участка изготовлены отборники статического давления. По длине поверхности с углублениями в канале рабочего участка установлены хромель-копелевые термопары для измерения температуры поверхности. На входе и выходе из рабочего участка по поперек воздушного тракта установлены гребенки термопар для определения температуры потока до и после рабочего участка. По измеренным значениям перепада давления Δp на рабочем участке, давления на входе в него, расхода воздуха G , температурам потока на входе и выходе из участка, средней температуре поверхности теплообмена, а также мощности, подаваемой на электронагреватель, определяется коэффициент гидравлического сопротивления ξ_d и средний коэффициент теплоотдачи α :

$$\xi_d = 2 \cdot \Delta P \cdot d_3 / (\rho \cdot w^2 \cdot L), \quad (1)$$

$$\alpha = Q / (\Delta t \cdot F), \quad (2)$$

где w – среднерасходная скорость воздушного потока, $w = G / (\rho \cdot F_k)$; d_3 – эквивалентный диаметр щелевого канала рабочего участка, $d_3 = 4F / \Pi$; $\Delta t = t_w - t_f$ – разность средних температур нагреваемой интенсифицированной поверхности и средней температуры потока в канале рабочего участка; Q – тепловой поток, отводимый от нагреваемой поверхности, определяемый калориметрическим способом по измеренным расходу и температурам потока и контролируемый по параметрам электрического тока, подаваемого на нагреватель под рабочей поверхностью, с учетом потерь тепловой энергии; F – поверхность теплообмена, рассчитываемая без учета развития поверхности углублений (по гладкой поверхности). По имеющимся экспериментальным данным определяются числа Нуссельта $Nu_d = \alpha d_e / \lambda$, числа Прандтля $Pr = \mu c / \rho$, числа Рейнольдса $Re_d = \rho \bar{v} d_e / \mu$. В качестве определяющих размеров при вычислении критериев подобия использовалась эквивалентный диаметр d_3 щелевого канала рабочего участка, а в качестве определяющей температуры – средняя температура теплоносителя в канале.

Проведена оценка неопределенности измерений. Установлено, что величина коэффициента гидравлического сопротивления определяется с относительной расширенной неопределенностью от 7.0 до 13.4 %, значения числа Нуссельта от 9.0 до 14.9 % при доверительной вероятности $P=0.95$. Выполнено тестирование работы установок и методик обработки экспериментальных данных на

основе сравнения полученных результатов с известными зависимостями. Выявлено, что по коэффициентам гидравлического сопротивления максимальное отклонение экспериментальных данных от известных зависимостей для ламинарного и турбулентного течений не более 10 %, а по коэффициентам теплоотдачи составляет 10-15 %, что показывает работоспособность оборудования и адекватность методик обработки результатов экспериментов.

В третьей главе рассмотрены результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления и теплоотдачи в каналах с системами овально-траншейных выемок, дано описание уровней интенсификации теплоотдачи, оценена теплогидравлическая эффективность, даны рекомендации по рациональным размерам вихрегенераторов и расчетной оценке гидравлического сопротивления и теплоотдачи в щелевых каналах с ними.

На основе анализа физических процессов в сферических и овальных выемках различного удлинения предложена конструкция перспективной формы интенсификаторов в виде овально-траншейных выемок, наклоненных под углом φ к набегающему потоку. На конструкцию данного углубления получен патент РФ.

Овально-траншейная выемка имеет общую длину l_d , которая равна длине цилиндрической части l выемки и радиусы $b/2$ двух половинок сферических выемок (рис.4). Таким образом, ширина овально-траншейной выемки составляет b . Выемка образована заглублением сферы радиусом R на глубину h . При этом, в зависимости от глубины заглубления образующей сферы диаметром R получаются различные соотношения h/b , изменяющиеся в диапазоне от 0 до 0.5. В предельном случае $h=R$ или $h/b=0.5$, т.к. значение b будет $2R$. В зависимости от способа промышленного производства сопряжение выемки и исходной плоской поверхности происходит с радиусом r скругления кромок.

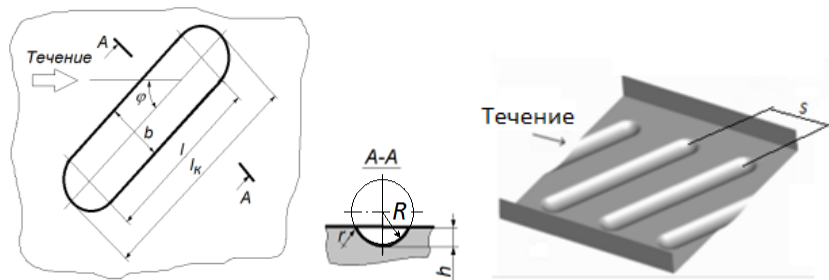


Рис.4. Схема овально-траншейной выемки: l - длина цилиндрической части выемки, мм; l_d - длина выемки, мм; h - глубина выемки, мм; b - ширина выемки, мм; r - радиус скругления кромок выемки, мм; φ - угол натекания потока на выемку, градусы, S - шаг выемок.

В качестве объекта исследования выбрана овально-траншейная выемка с геометрическими соотношениями: $l/b = 5,78$ или $l_d/b = 6,78$; $\varphi=45^\circ$; $h/b = 0,25-0,33$; $r = 0,025 \times b$.

Для проверки ранее полученных результатов численных исследований С.А. Исаева проведены экспериментальные исследования гидродинамики в каналах с различными типами интенсификаторов. Овально-траншейная выемка является поверхностным генератором спиралевидных высокоинтенсивных моновихрей и позволяет повысить скорость вторичного течения до значений, характерных скорости потока в стесненном канале (среднемассовой или максимальной), что в несколько раз превышает скорости вторичного течения, индуцированные традиционными сферическими выемками, и отличается высокой стабильностью и интенсивностью вихревого течения в следе за ним по сравнению с аналогами в виде овальных выемок различного удлинения.

Анализ результатов визуализации обтекания овально-траншейных выемок (рис.5) показывает, что в области крайней по ходу течения кромки овально-траншейной выемки возникают области с пониженными скоростями, а значит с малыми локальными коэффициентами теплоотдачи. Это было подтверждено и результатами тепловизионных исследований. Как показано, удлинение выемок, а значит появление данных областей, неизбежно, но необходимы решения по повышению скорости течения.

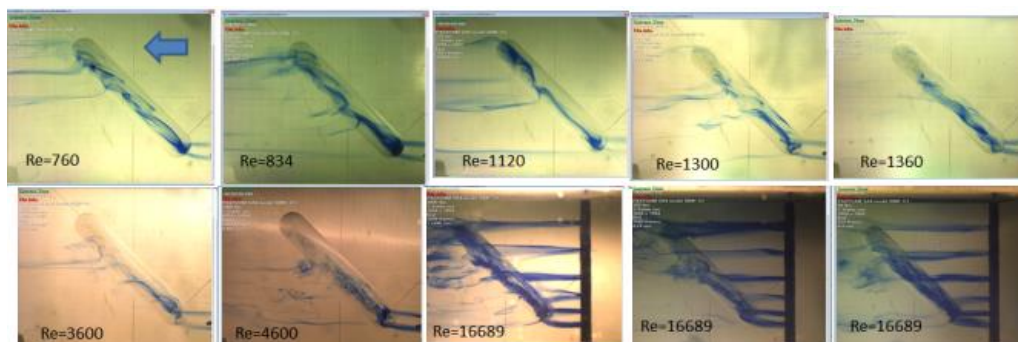


Рис.5. Визуализация течения в окрестности овально-траншейной выемки с относительными размерами $h/b=0,5$ и $l_d/b=7$ при различных скоростях потока

Описаны особенности интенсификации в щелевых каналах, заключающиеся в рассмотрении гидродинамически длинных каналов и взаимодействии вихревой структуры с основным потоком, вызывающие вторичные вихревые потоки в щелевом канале.

В ходе изучения гидродинамики и теплообмена в каналах с поверхностными интенсификаторами проведены исследования с использованием систем овально-траншейных выемок. Исследованы одно- и многорядная системы овально-траншейных выемок, схемы которых показаны на рис.6.



Рис.6. Схемы многорядной (а) и однорядной (б) систем овально-траншейных выемок

Исследования коэффициентов сопротивления проводилось при тчении воздуха в каналах длиной $L=270$ мм, высотой $H=3$ мм и шириной $B=21$ мм с нижними стенками, покрытыми однорядными системами овально-траншейных выемок, и в каналах длиной $L=198$ мм, высотой $H=1,5$ мм и шириной $B=98$ мм с нижними стенками, покрытыми многорядными системами овально-траншейных выемок.

Установлено, что коэффициенты гидравлического сопротивления канала с односторонним расположением однорядной системы выемок $h/b=0,33$; $l_d/b=6,78$ (рис.7) примерно на 40 % выше, чем в плоском гладком канале, при турбулентном режиме течения теплоносителя. Установлено, что коэффициенты гидравлического сопротивления канала с односторонним расположением многорядной системы овально-траншейных выемок $h/b=0,25$; $l_d/b=6,78$ (рис.7) в 2,5-3 раза выше, чем в плоском гладком канале, при турбулентном режиме течения теплоносителя и на 25% выше, чем у шахматных систем сферических выемок при той же площади пятна одиночных углублений. При ламинарном режиме уровень значений коэффициентов гидравлического сопротивления практически совпадает со значениями для гладкостенного канала.

Выявлено, что коэффициенты теплоотдачи канала с односторонним расположением однорядной системы выемок $h/b=0,33$; $l_d/b=6,78$ (рис.8,а) на 20-55 % выше при турбулентном режиме течения теплоносителя в диапазоне изменения чисел Рейнольдса $Re_d = 3200 \div 9 \cdot 10^4$, чем в плоском гладком канале. Выявлено, что коэффициенты теплоотдачи канала с односторонним расположением многорядной системы выемок $h/b=0,25$; $l_d/b=6,78$ (рис.8,б) в 2,3-2,5 раза выше при турбулентном режиме течения теплоносителя в диапазоне изменения

чисел Рейнольдса $Re_d = 4 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$, чем в плоском гладком канале, и на 10% выше, чем у шахматных систем сферических выемок при той же площади пятна одиночных углублений.

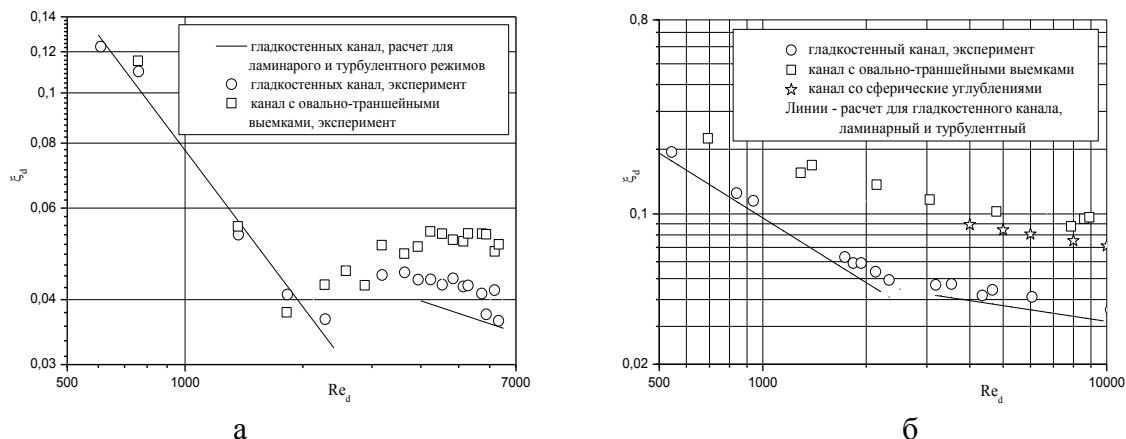


Рис.7. Коэффициенты гидравлического сопротивления в каналах со стенкой, покрытой однорядной (а) и многорядной (б) системами овально-траншейных выемок

Результаты оценки значений повышения коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления показаны в табл.1.

Сравнительный анализ теплогидравлической эффективности рассмотренных каналов с одно- и многорядными системами овально-траншейных выемок относительной глубины $h/b=0,25-0,33$ и относительной длины $l_d/b=6,78$ производился по критериям тепловой эффективности Nu/Nu_0 и по фактору аналогии Рейнольдса $E=(Nu/Nu_0)/(\zeta/\zeta_0)$, где Nu_0 и ζ_0 – значения числа Нуссельта и коэффициента гидравлического сопротивления в гладкостенном канале.

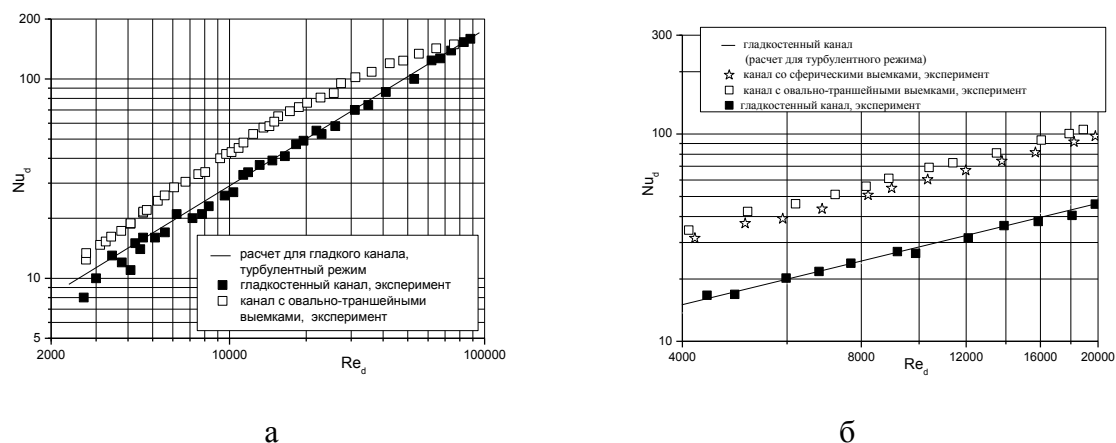


Рис.8. Коэффициенты теплоотдачи в каналах со стенкой, покрытой однорядными (а) и многорядными (б) системами овально-траншейных выемок.

Результаты оценки теплогидравлической эффективности в каналах с различными типами компоновок овально-траншейных выемок показаны в табл.1. Сравнение уровня теплогидравлической эффективности одно- и многорядных систем овально-траншейных выемок и выявленная практически одинаковая их тепловая эффективность показывают, что повышение взаимодействия вихревых структур, истекающих из углублений при многорядных системах значительно увеличивают гидравлического сопротивление канала.

Верификация результатов численных исследований С.А. Исаева производилась на основе полученных экспериментальных данных для течения воздуха в узком плоскопараллельном канале шириной $9h_{ch}$ и высотой h_{ch} при $Re_h = 10^4$.

Таблица 1 - Сопоставление экспериментальных данных по уровню интенсификации теплоотдачи и повышению гидравлического сопротивления в каналах с различными компоновками овально-траншейных выемок

Тип поверхности	Тип выемок	Относительные размеры выемок		Диапазон режимных параметров		Nu/Nu_0	ξ/ξ_0	E_{max}
		h/b	l_d/b	Re_d	Pr			
Многорядные	Овально-траншейные	0.25	6,78	$4 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$	0.72	$2.3 \div 2.43$	$2.5 \div 3$	0.97
Однорядные	Овально-траншейные	0.33		$3200 \div 9 \cdot 10^4$		$1.2 \div 1.55$		

Сопоставление экспериментальных по интегральным характеристикам канала и расчетных данных по периодической секции (площадка прямоугольная площадка с выемкой) при близких геометрических параметрах канала и выемок показывает, что согласование удовлетворительное (рис.9). Прирост теплоотдачи Nu/Nu_0 по результатам численного исследования составляет 1,54 раз, а согласно экспериментальным данным – 1,55 раза, различие составляет менее 1%. Прирост гидравлического сопротивления ξ/ξ_0 по результатам численного исследования составляет 1,39 раз, а согласно экспериментальным данным – 1,4 раза, различие составляет – менее 1%. В результате различие расчетного и экспериментального значения теплогидравлической эффективности $E=(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ составляет около 1%, при значении расчетного – $E=1,1$, и экспериментального – $E=1,11$.

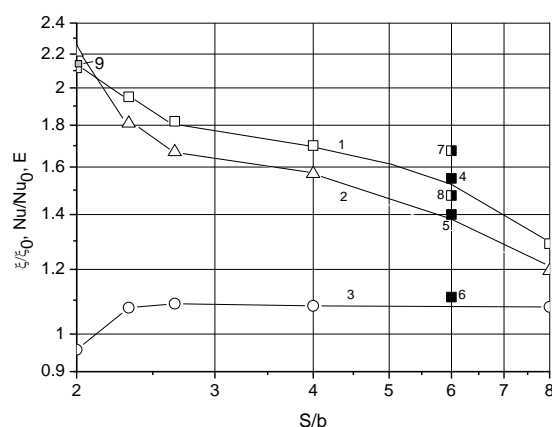


Рис.9. Зависимость относительной теплоотдачи Nu/Nu_0 (1), относительного гидравлического сопротивления ξ/ξ_0 (2) и теплогидравлической эффективности $E=(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ (3) по длине периодической секции с овально-траншейными выемками от относительного шага нанесения выемок S/b по результатам численных исследований С.А. Исаева. Точки 4,5,6 – соответственно относительная теплоотдача, относительное гидравлического сопротивления и теплогидравлическая эффективность, полученная в ходе эксперимента. Точки 7,8 – соответственно относительная теплоотдача и относительное гидравлическое сопротивление, полученные с использованием модели нейронной сети, 9 – результаты экспериментального исследования Н.И. Михеева и Н.С. Душина.

Сравнение полученных данных по тепловой эффективности и приросту гидравлического сопротивления для каналов с одно- и многорядными системами овально-траншейных выемок производилось по методикам, предложенной А.А. Халатовым (рис.10,а) и Ф. Лиграни (рис.10,б). Сравнение выполнено и любезно предоставлено Н. Корневым (Росток, Германия).

Видно, что результаты исследования не выпадают по уровню показателей из общей тенденции наиболее эффективных видов поверхностных интенсификаторов теплоотдачи.

Полученные в работе сведения о коэффициентах теплоотдачи и гидравлического сопротивления в каналах с системами овално-траншейных выемок могут использоваться при разработке и создании теплообменных аппаратов и проточных систем охлаждения теплонагруженных элементов. Для прогнозирования теплогидравлических характеристик каналов с овално-траншейными выемками могут использоваться критериальные уравнения, полученные на основе обобщения результатов экспериментальных и численных исследований.

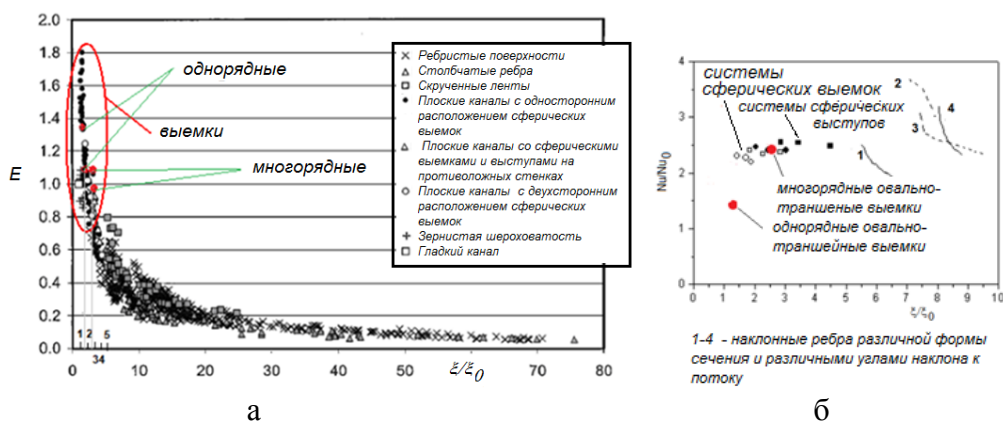


Рис.10. Сравнение различных интенсификаторов по теплогидравлической эффективности по методикам А.А. Халатова (а) и Ф. Лиграни (б). Красные точки - овално-траншейные выемки

Для наиболее технически перспективного диапазона геометрических параметров выемок (обеспечивающих максимальную теплогидравлическую эффективность) - $h/b=0,0625-0,25$, $S/b=2-8$, $l_d/b=3-6,78$, $\varphi=45-60$, и турбулентного режима течения получены уравнения для коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи в канале с однорядным расположением овално-траншейных углублений:

$$\xi_d = 1.23(h/b)^{0.22}(S/b)^{-0.385}(l_d/b)^{-0.023}(\varphi/90)^{-0.027}/Re_d^{0.25} \quad (3)$$

$$Nu_d = 0.162 \cdot Re_d^{0.72} Pr^{0.4} (h/b)^{0.317} (S/b)^{-0.336} (l_d/b)^{0.083} (\varphi/90)^{-0.075} \quad (4)$$

Здесь, характерная температура – температура воздуха на входе в канал, определяющая скорость – среднemasовая скорость потока в канале, определяющий линейный размер – гидравлический диаметр канала. Уравнения описывают теплогидравлические характеристики канала с овално-траншейными выемками с отклонением не более 20%. Зависимости (3) и (4) получены при совместном обобщении результатов экспериментальных результатов данной работы и результатов численных исследований С.А. Исаева.

Для многорядных систем овално-траншейных выемок подобные расчетные рекомендации в данной работе не даны, т.к. для подобной конфигурации выемок эксперимент проведен только на одной геометрии, а результаты численных исследований отсутствуют. Однако следует указать, что эксперименты проведены для рациональных параметров одиночной овално-траншейной выемки.

В связи со сложным влиянием параметров выемок и их расположения, наличия экстремумов в зависимостях теплогидравлических характеристик от геометрических параметров выемок, необходим целый комплекс критериальных уравнений для различных диапазонов определяющих режимных и геометрических параметров. Для упрощения прогнозирования теплогидравлических характеристик каналов с овално-траншейными выемками во всем исследованном в данной работе и в численных исследованиях С.А. Исаева диапазоне изменения параметров предложена модель нейронной сети.

Разработана модель нейронной сети для расчета величин коэффициентов трения и теплоотдачи на основе написания программного кода на языке Python 3.0. По результатам работ С.А. Исаева было проведено обучение модели, а в качестве тестовой выборки использовались результаты экспериментального исследования трения и теплоотдачи при течении воздуха в узком плоскопараллельном канале с однорядными системами овально-траншейных выемок. Сравнение результатов численного исследования и прогнозирования с использованием нейронной сети показало удовлетворительное совпадение - $\xi/\xi_0=1.39$ при численном исследовании, $\xi/\xi_0=1.4$ при экспериментальном исследовании и $\xi/\xi_0=1,46$ при использовании модели нейронной сети; $Nu/Nu_0=1.54$ при численном исследовании, $Nu/Nu_0=1.55$ при экспериментальном исследовании и $Nu/Nu_0=1.66$ при использовании модели нейронной сети. Отклонение рассчитанного значения коэффициента гидравлического сопротивления составило для тестовой выборки - не более 5%, а для коэффициента теплоотдачи – не более 8% (рис.9).

В четвертой главе рассмотрены результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления и теплоотдачи в каналах с системами овально-дуговых выемок, дано описание уровней интенсификации теплоотдачи, оценена теплогидравлическая эффективность, даны рекомендации по рациональным размерам вихрегенераторов и уровням интенсификации теплоотдачи в щелевых каналах с ними.

Анализ результатов визуализации обтекания овально-траншейных выемок (рис.5) ранее показал, что в области крайней по длине выемки и ходу течения кромки овально-траншейной выемки возникают области с пониженными скоростями, а значит с малыми локальными коэффициентами теплоотдачи. Это было подтверждено и результатами тепловизионных исследований и результатами численных исследований С.А.Исаева. Необходимы решения по повышению скорости течения и, как следствие, локальных коэффициентов теплоотдачи по всей длине выемки. Для этого была предложена геометрия в виде овально-дуговых выемок.

Технический результат достигается за счет того, что теплообменная поверхность для интенсификации теплоотдачи при турбулентном течении теплоносителя, выполненная в виде периодически нанесенных выемок овально-дуговой формы (рис.11), состоящей из двух половинок сферической выемки диаметром b , соединенных цилиндрическим торообразным сегментом длиной l , отличающаяся тем, что касательная к направляющей кривой к вышеупомянутому сегменту составляет угол $\varphi=45^\circ$ по отношению к направлению потока в начале углубления и угол $\varphi=0^\circ$ в конце выемки с геометрическими соотношениями: $l/b=4,7-5,78$ или $l_k/b=5,57-6,78$; $h/b=0,18-0,37$; $r=0,025b$; l - длина цилиндрической части углубления, мм; l_k - длина углубления, мм; h - глубина углубления, мм; b – ширина углубления, мм; r – радиус скругления кромок углубления, мм; φ - угол между направлением потока и касательной к направляющей кривой торообразного сегмента. На конструкцию вихрегенератора получен патент РФ.

В качестве объекта исследования выбрана овально-дуговая выемка с геометрическими соотношениями: $l/b = 5,78$ или $l_d/b = 6,78$; $\varphi=45^\circ$; $h/b = 0,25-0,33$; $r = 0,025 \times b$. В ходе изучения гидродинамики и теплообмена в каналах с поверхностными интенсификаторами в виде овально-дуговых выемок проведены исследования с одно- и многорядных систем овально-дуговых выемок, схемы которых аналогичны показанным на рис.6.

Первичные результаты исследований картин растекания потока вблизи овально-дуговых выемок (рис.12) показали отсутствие застойных зон во второй половине выемки по сравнению с овально-траншейными выемками, а значит увеличение локальных скоростей в них и, как следствие, прогнозирование повышения локальных коэффициентов теплоотдачи.

Исследования коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи проведены в каналах тех же размеров, что и в случае исследования овально-траншейных выемок.

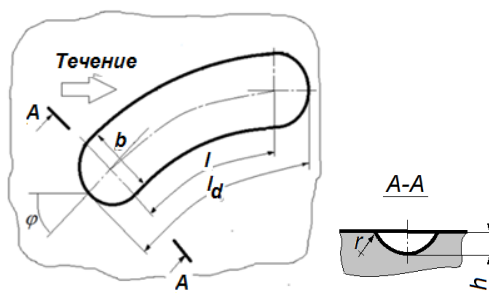


Рис.11. Схема овально-дуговой выемки: l - длина цилиндрической части выемки, мм; l_d - длина выемки, мм; h - глубина, мм; b - ширина выемки, мм; r - радиус скругления кромок выемки, мм; φ - угол натекания потока на выемку, градусы.

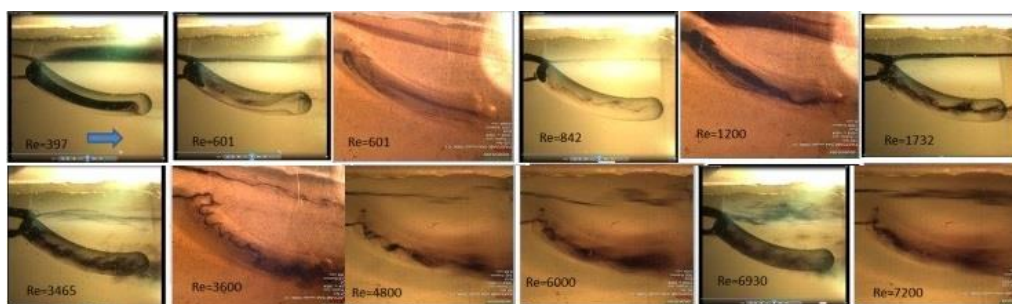


Рис.12. Визуализация течения в окрестности овально-дуговой выемки с относительными размерами $h/b=0,5$ и $l_d/b=7$ при различных скоростях потока

Установлено, что коэффициенты гидравлического сопротивления канала с односторонним расположением однорядной системы выемок $h/b=0,33$; $l_d/b=6,78$ (рис.13,а) примерно на 25 % выше, чем в плоском гладком канале, при турбулентном режиме течения теплоносителя. Это ниже, чем уровень сопротивления в канале с однорядной системой овально-траншейных выемок на 12%. Коэффициенты гидравлического сопротивления канала с односторонним расположением многорядной системы овально-траншейных выемок $h/b=0,25$; $l_d/b=6,78$ (рис.13,б) в 2,2-2,6 раза выше, чем в плоском гладком канале, при турбулентном режиме течения теплоносителя и на 12% выше, чем у шахматных систем сферических выемок при той же площади пятна одиночных выемок. Уровень сопротивления в канале с однорядной системой овально-траншейных выемок на 8-15% ниже, чем уровень сопротивления в канале с овально-траншейными выемками при турбулентном режиме течения. При ламинарном режиме уровень значений коэффициентов гидравлического сопротивления практически совпадает со значениями для гладкостенного канала.

Выявлено, что коэффициенты теплоотдачи канала с односторонним расположением однорядной системы выемок $h/b=0,33$; $l_d/b=6,78$ (рис. 14,а) на 20-71 % выше при турбулентном режиме течения теплоносителя в диапазоне изменения чисел Рейнольдса $Re_d = 3200 \div 9 \cdot 10^4$, чем в плоском гладком канале. Уровень теплоотдачи в канале с однорядной системой овально-траншейных выемок до 10% выше, чем уровень сопротивления в канале с овально-траншейными выемками при турбулентном режиме течения. Коэффициенты теплоотдачи канала с односторонним расположением многорядной системы выемок $h/b=0,25$; $l_d/b=6,78$ (рис.14,б) в 2,5 раза выше при турбулентном режиме течения теплоносителя в диапазоне изменения чисел Рейнольдса $Re_d = 4 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$, чем в плоском гладком канале, и на 7% выше, чем у шахматных систем сферических выемок при той же площади пятна одиночных выемок.

Результаты оценки теплогидравлической эффективности в каналах с различными типами компоновок овально-дуговых выемок показаны в таблице 2. Теплогидравлическая эффективность каналов с овально-дуговыми выемками на 23 и 14% выше, чем для овально-траншейных выемок при одно- и многорядном расположении, соответственно.

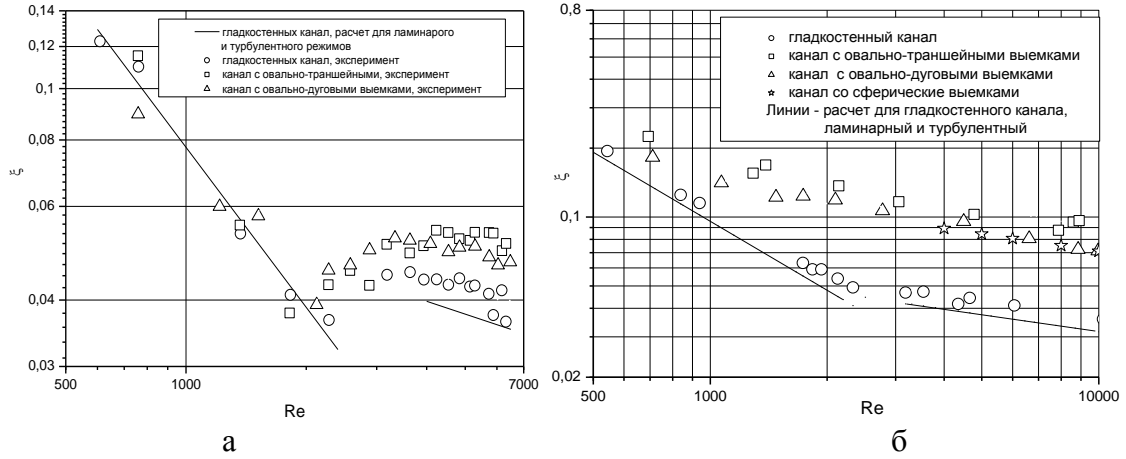


Рис.13. Коэффициенты гидравлического сопротивления в каналах со стенкой, покрытой однорядной (а) и многорядной (б) системами овално-дугowych выемок

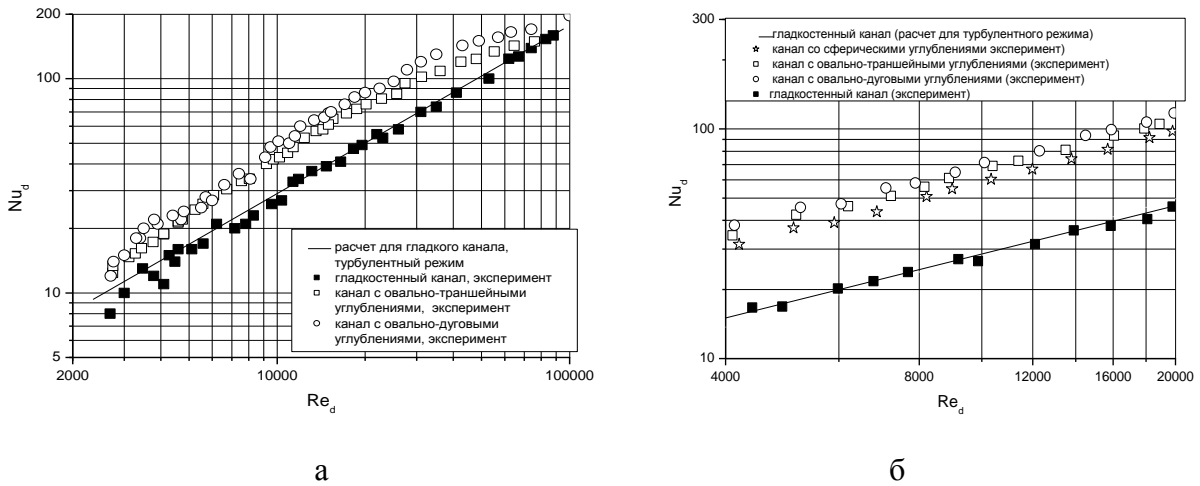


Рис.14. Коэффициенты теплоотдачи в каналах со стенкой, покрытой однорядными (а) и многорядными (б) системами овално-дугowych выемок.

Таблица 2 - Сопоставление экспериментальных данных по уровню интенсификации теплоотдачи и повышению гидравлического сопротивления в каналах с различными компоновками овално-траншейных выемок

Тип поверхности	Тип выемок	Относительные размеры выемок		Диапазон режимных параметров		Nu/Nu_0	ζ/ζ_0	E_{max}
		h/b	l_d/b	Re_d	Pr			
Многорядные	Овално-дугowe	0.25	6,78	$4 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$	0.72	~2.5	2.3-2.6	1.11
Однорядные	Овално-дугowe	0.33		$3200 \div 9 \cdot 10^4$				

Основной механизм интенсификации в овално-дугowych выемках остается прежним - увеличение скорости вихревых структур в выемке и скорости основного потока на границе пограничного слоя в следе, зависящие только от относительного удлинения выемки, и периодическое разрушение пограничного слоя с повышением теплоотдачи в области присоединения потока по задней кромке выемки.

Пятая глава содержит результаты численного исследования гидравлического сопротивления и теплоотдачи в каналах с системами выемок в форме бумеранга, описание уровней интенсификации теплоотдачи, оценку теплогидравлической эффективности, рекомендации по рациональным размерам вихрегенераторов.

Предложена и запатентована конструкция нового по форме поверхностного интенсификатора в виде периодически нанесенных выемок в виде бумерангов. Данная конструкция ликвидирует недостатки интенсификаторов в виде овально-траншейной выемки и имеет повышенную эффективность по сравнению с овально-дугowymi выемками.

Технический результат повышения эффективности достигается за счет того, что теплообменная поверхность для интенсификации теплоотдачи при турбулентном течении теплоносителя выполнена в виде периодически нанесенных выемок. Новым является то, что выемки выполнены в форме бумеранга (рис.15), состоящей из двух половинок сферической выемки диаметром b , соединенных цилиндрическими сегментами общей длиной $l=l_1+l_2$ таким образом, чтобы бы реализовывалось условие, что касательная к сегменту длиной l_1 составляла угол $\varphi=45^\circ$ по отношению к направлению потока в начале выемки и угол 0° к сегменту выемки длиной l_2 , с геометрическими соотношениями: относительной глубиной $l/b=4,7-5,78$ или $l_w/b=5,57-6,78$, относительной глубиной $h/b=0,18-0,37$; соотношение длин $l_1/l=0,5-0,6$; радиус скругления кромок $r=0,025b$.

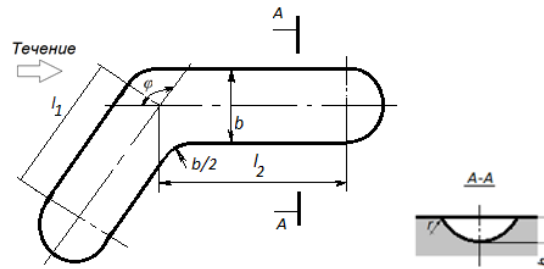


Рис.15. Поверхностный интенсификатор в виде выемки в форме бумеранга

Анализ теплогидравлических характеристик теплообменных каналов с предложенным поверхностным интенсификатором теплоотдачи в виде выемки в форме бумеранга проводился на основе результатов численного моделирования, выполненного с использованием многоблочных вычислительных технологий, реализованных в пакете VP2/3. Постановка задачи, математическая модель и технология решения идентичны ранее описанным численным исследованиям в работах С.А. Исаева.

Течение теплоносителя внутри канала с вихрегенераторами предполагает возникновение зон высокоскоростного движения. Число Рейнольдса Re_H , рассчитанное по характерным геометрическим размерам, скорости потока и коэффициенту кинематической вязкости теплоносителя, взятой при рабочей температуре и давлении, составляет $1,65 \cdot 10^4$. В этой связи для численного моделирования выбран метод URANS (решение нестационарных уравнений Навье-Стокса), который предполагает решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, уравнения неразрывности и уравнения энергии в формулировке для энтальпии. Исходные уравнения решаются конечно-объемным факторизованным методом с помощью многоблочных вычислительных технологий. В алгоритме расчета использовались процедура коррекции давления SIMPLEC; аппроксимация конвективных членов в явной части уравнения импульса с использованием одномерной квадратичной схемы восходящего потока Леонарда для уменьшения влияния численной разницы, специфичной для рассматриваемого типа отрывного потока, и с использованием схемы Ван Леера; представление конвективных членов в реализующей части уравнений переноса с использованием схемы противотока с односторонними различиями; методы с предварительными условиями для решения разностных уравнений. Система осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье-Стокса для сжимаемой жидкости замыкается с помощью SST $k-\omega$ модели турбулентности Ментера.

Исследования проведены на поверхности с одиночным выемкам в форме бумеранга для различных отношений сторон выемки в форме бумеранга l_1/l и относительной длиной $l_k/b=(l_1+l_2+b)/b=(l+b)/b=5$ (рис.16,а). Высота канала $H=0.05\text{м}$ принимается в качестве характерного размера. Безразмерная ширина канала равна $2H$, а длина - $12H$, ширина выемки - $b=0.6H$, глубина выемки - $h=0.15H$ и общая длина - $l_k=3H$, угол наклона входной части выемки к потоку равен 45° , угол наклона выходной части к потоку - 0° , радиус скругления кромки - $r=0.02H$. Канавка располагается в середине канала (рис.17) на расстоянии $6H$ от входного сечения. Толщина пограничного слоя на входе в рабочий участок канала имеет величину порядка $0.1H$. Степень турбулентности во входном сечении выбирается равной 0.5% , а масштаб турбулентности принимается равным характерному размеру H .

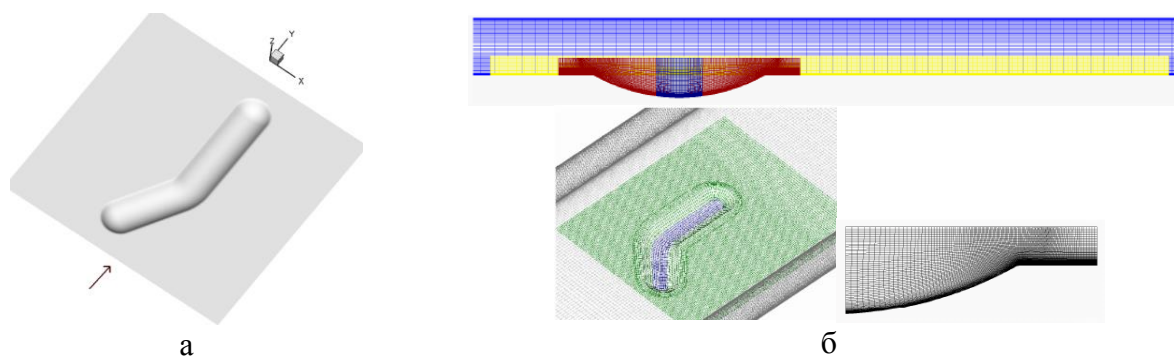


Рис.16. Поверхностный интенсификатор в виде выемки в форме бумеранга с $l_2/l=0,6$

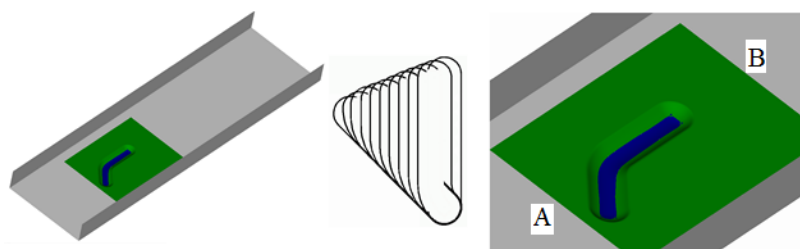


Рис.17. Расчетная область в виде канала с выемкой в форме бумеранга

При численном исследовании применены многоблочные структурированные пересекающиеся разномасштабные сетки (рис. 16,б). Для дискретизации расчетной области использовались 4 области со структурированными сетками. Многоблочная расчетная сетка содержит порядка 4 млн. ячеек. Пристеночный шаг равен 10^{-5} . Обоснование сеточной независимости для выемок различной формы, в том числе овально-траншейных, являющихся предельным случаем рассматриваемого типа выемок при $l_1/l=0$ было выполнено и представлено в работах С.А. Исаева.

На входе в расчетную область задавалось значение массового расхода теплоносителя, давление и температура. На выходных границах расчетной области задавались соответствующие статические давления (противодавления) и мягкие граничные условия для скорости и температуры, в каждый момент времени. На стенках, контактирующих с теплоносителем, ставилось условие прилипания. Для задания турбулентных характеристик вблизи стенок применяется метод пристеночных функций с использованием логарифмического закона стенки. Рассматривается условие постоянного теплового потока.

Рассматривается течение сжимаемой жидкости. На стенках соблюдаются условия прилипания. Для достоверного описания происходящих теплофизических процессов задавались зависимости теплофизических характеристик теплоносителя от температуры и давления.

Сходимость итераций определяется по достижению максимальных приращений зависимых переменных уровня 10^{-5} . Устойчивое решение относительно отдельных параметров наблюдалось после 1500-3000 итераций, тогда как весь расчет происходил в

течение более чем 10000 итераций. Верификация прототипа расчетной модели ранее проведена в работах С.А. Исаева при использовании результатов экспериментальных исследований В.И. Терехова для сферических выемок и С.В. Гувернюка, Н.И. Михеева, И.А. Попова, А.В. Воскобойника, С.З. Сапожникова для овально-траншейных выемок и их систем.

Пример результатов численного исследования развития течения в выемках в форме бумеранг представлены на рис.18. Установлено, что начиная с $l_2/l=0,4$ до 0,8 вторичный поток в выемке остается в ней до самой задней крайней кромки, не производя выброс из выемки и не уменьшая тем самым скорость вторичного течения в самой выемке. Таким образом, доказана основная идея по повышению эффективности выемок в форме бумеранг - поддержание высоких скоростей вторичного потока в выемке и тем самым поддержания повышенной теплоотдачи в ней по сравнению с овально-траншейными и даже овально-дугowymi выемками.



Рис.18. Результаты численного исследования развития течения в выемках с геометрическим параметром $l_1/l = 0,4, 0,6, 0,7$.

Коэффициенты гидравлического сопротивления в канале с выемками ξ и без них ξ_0 определялись по границам контрольного участка А-В (рис.17) с выемкой по расчетной потере давления ΔP : $\xi = 2 \cdot \Delta P \cdot H / (\rho \cdot U \cdot L)$. Число Нуссельта Nu_H определяется по градиенту температуры на стенке и перепаду между температурой стенки и среднemasсовой температурой в соответствующем поперечном сечении канала и рассчитывается на контрольной площади окружающего выемку прямоугольного участка А-В (рис.17) с учетом увеличения криволинейной поверхности выемки.

Примеры результатов численного исследования распределения безразмерного давления $P = (P_i - P_{вх}) / (\rho U^2)$ (где P_i – давление в текущей точке; $P_{вх}$ – давление на входе в канал) и относительных чисел Нуссельта Nu/Nu_0 (где $Nu_0 = \alpha_0 \cdot H / \lambda$ и $Nu = \alpha \cdot H / \lambda$ - числа Нуссельта ровной поверхности и поверхности с выемкой) на поверхности с одиночным выемкам в форме бумеранга представлены на рис.19,а и рис.18,б, соответственно.

Теплогидравлическая эффективность рассчитывается $E = (Nu/Nu_0) / (\xi/\xi_0)^{0,3}$. В ходе численных исследований показано (рис.20), что темп возрастания тепловой эффективности значительно опережает рост гидравлических потерь. Тепловая эффективность поверхности с выемкам в форме бумеранга также максимальна при соотношении длин $l_1/l=0,5$ и составляет $Nu/Nu_0=1,115$. Для сравнения для поверхности с овально-траншейным выемкам ($l_1/l=1,0$) тепловая эффективность ниже - $Nu/Nu_0=1,09$. Гидравлические потери на участке поверхности с выемкам в форме бумеранга также максимальны при соотношении длин $l_1/l=0,5$ и составляют $\xi/\xi_0=1,17$. Однако для поверхности с овально-траншейным выемкам ($l_1/l=1,0$) прирост гидравлического сопротивления ниже - $\xi/\xi_0=1,127$. В итоге, максимальная теплогидравлическая эффективность $E=1,06$ получена для выемки в форме бумеранга с относительным удлинением $l_k/b=(l_1+l_2+b)/b=6,78$ при соотношении длин $l_1/l=0,5-0,6$.

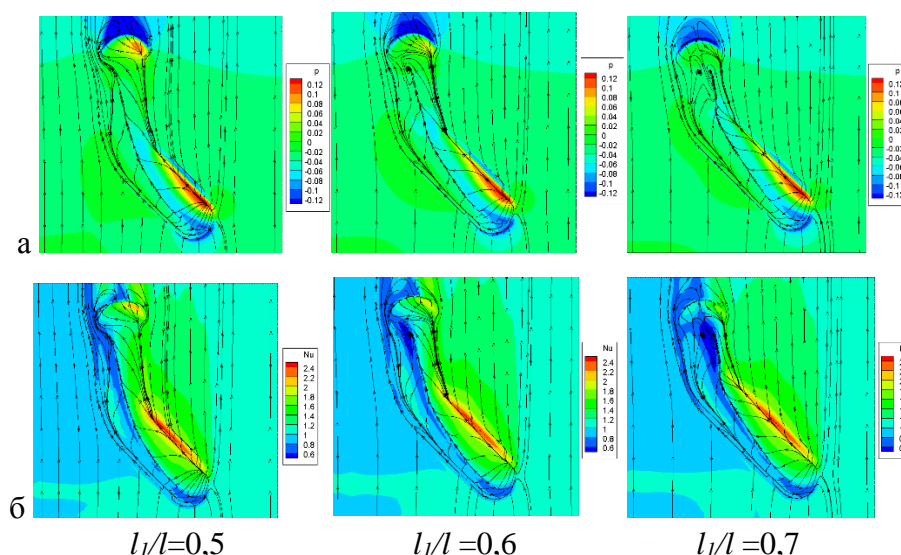


Рис.19. Результаты численного исследования распределения давления (а) и относительных чисел Нуссельта (б) на поверхности на поверхности с одиночными выемками в форме бумеранга

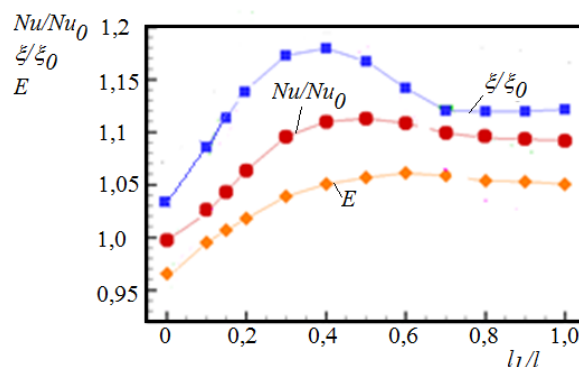


Рис.20. Теплогидравлическая эффективность поверхности с одиночными выемками в форме бумеранга

Выполненное сравнение предлагаемой конструкции теплообменной поверхности с выемками в форме бумеранга по теплогидравлической эффективности (критерию аналогии Рейнольдса) с поверхностью с овально-траншейными выемками показало преимущество выемок в форме бумеранга при соблюдении геометрических соотношений размеров выемки: $l/b=4,7-5,78$ или $l_k/b=5,57-6,78$; $l_1/l=0,5-0,6$; $\varphi=45^\circ$; $h/b=0,18-0,37$; $r=0,025b$.

В приложении приведены акт внедрения результатов работы и патенты на изобретения.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Проведен обзор литературных источников по численному исследованию гидродинамики и теплообмена в каналах с выемками. Для турбулентного режима течения теплоносителя выявлены и запатентованы рациональные размеры овально-траншейных и овально-дугowych выемок – удлинение углублений $l/b=5,57\div 6,78$ и относительная глубина $h/b=0,18\div 0,37$, угол натекания потока на выемку $\varphi=(45\div 60)^\circ$.

2. Проведено экспериментальное исследование коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи в щелевых каналах с одно- и многорядными системами овально-траншейных и овально-дугowych выемок в диапазоне режимных параметров – $Pr=0,71$, $Re_d=3200\div 9\cdot 10^4$ для теплоотдачи и $Re_d=500\div 10^4$ для гидравлического сопротивления, и геометрических характеристик поверхностей с выемками, которые находятся в диапазоне рациональных - $h/b=0,25$ и $0,33$, $l_d/b=7$, $\varphi=45^\circ$.

3. Выявлено хорошее согласование результатов численных исследований С.А.Исаева для каналов с овально-траншейными выемками и экспериментальных исследований при

турбулентном течении с отклонениями по средним коэффициентам теплоотдачи и гидравлического сопротивления не более 5%.

4. На основе анализа экспериментальных данных установлены уровни интенсификации теплоотдачи при турбулентном режиме течения – $Nu/Nu_0=1.2\div 1.7$ в однорядных системах овално-траншейных и овално-дуговых выемок и $Nu/Nu_0=2.3\div 2.5$ раза в многорядных системах этих выемок. Установлено, что уровень интенсификации в каналах с овално-дуговыми выемками на 5÷10% выше, чем с овално-траншейными выемками. Повышение гидравлического сопротивления сопоставимо с ростом теплоотдачи и составляет при турбулентном режиме течения – $\xi/\xi_0=1.25\div 1.4$ раза в однорядных системах овално-траншейных и овално-дуговых выемок и $\xi/\xi_0=2.3\div 3$ раза в многорядных системах этих выемок. Показано, что уровень гидравлического сопротивления в каналах с овално-дуговыми выемками меньше на 10÷13%, чем в каналах с овално-траншейными выемками. Это обеспечивает более высокую теплогидравлическую эффективность каналов с овално-дуговыми выемками - на 23 и 14% выше, чем для каналов с овално-траншейными выемками при одно- и многорядном расположении, соответственно.

5. Для более технически интересного диапазона геометрических параметров - $h/b=0.0625\div 0.25$, $S/b=2\div 8$, $l_d/b=3\div 7$, $\varphi =45\div 60$ и турбулентном режиме получены критериальные уравнений для оценки коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи в каналах с однорядными овално-траншейными выемками.

6. Для упрощения определения значений ξ/ξ_0 и Nu/Nu_0 для овално-траншейных выемок во всем диапазоне изменения определяющего режимных и геометрических параметров создан программный код, реализующий метод искусственной нейронной сети. Отклонение результатов расчета по данному методу от экспериментальных данных не превышает 5-8% для гидравлического сопротивления и теплопередачи.

7. Предложена и запатентована конструкция нового поверхностного интенсификатора в виде выемки в форме бумеранга. На основе численного моделирования проведена визуализация течений в выемке в форме бумеранга, определены теплоотдача, сопротивление и теплогидравлическая эффективность и рациональные размеры выемок в форме бумеранга.

8. Полученные в работе результаты рекомендуется использовать при прогнозировании теплоотдачи и гидравлического сопротивления в каналах теплообменного оборудования при использовании овално-дуговых, овално-траншейных выемок и выемок в форме бумеранга.

Результаты работы используются в учебном процессе при чтении лекций по курсам «Теплообменные аппараты» и «Теплотехнические системы и энергоустановки» в КНИТУ-КАИ, о чем имеется акт о внедрении.

Основные результаты работы представлены в следующих публикациях:

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Миронов, А.А. Физическое моделирование теплогидравлических характеристик каналов с овално-траншейными вихрегенераторами / А.А.Миронов, С.А.Исаев, А.Н.Скрыпник, И.А.Попов, Ю.Ф. Гортышов // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. №9. С. 386–402

2. Миронов, А.А. Повышение эффективности авиационных теплообменных аппаратов / А.А.Миронов, С.А.Исаев, И.А.Попов, Р.А.Аксянов, А.Н. Скрыпник // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. № 1. С. 134-140.

3. Миронов, А.А. Сопротивление и теплообмен одиночной трубы с поверхностными генераторами вихрей / Т.А.Баранова, Е.С.Данильчик, Ю.В.Жукова, Р.Г.Кадыров, Г.С.Маршалова, А.А.Миронов, И.А.Попов, А.Н.Скрыпник, А.Д. Чорный // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. №11. С. 495–508

4. Миронов, А.А. Гидродинамика и теплообмен в целевых каналах с перспективными поверхностными интенсификаторами / С.А.Исаев, Ю.Ф.Гортышов, И.А.Попов, А.А.Миронов, А.В. Щелчков // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2023. №4. С. 146-152.

5. Миронов А.А. Интенсификация теплообмена в наклонной канавке типа бумеранг на нагретой стенке канала при ориентированной по потоку концевой части / С.А.Исаев, Д.В.Никущенко, И.А.Попов, А.А. Миронов, А.А.Клюс, А.Г. Судаков // Письма в журнал технической физики. 2024. Т.50. №20. С.20-23.

В рецензируемых научных изданиях, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus:

6. Mironov, A. Numerical and physical simulation of heat transfer enhancement using oval dimple vortex generators —Review and recommendations / A.Mironov, S.Isaev, A.Skrypnik, I.Popov - Energies, 2020, 13(20), 5243

7. Mironov, A.A. Thermal-hydraulic performance of a single round tube with surface vortex generators / A.N. Skrypnik, A.D. Chorny, I.A. Popov, P.T. Kadyrov, A.A. Mironov, Yu.V. Zhukova, T.A. Baranova, G.S. Marshalova, E.S. Danilchik - Heat Transfer Research. 2022. Т. 53. № 9. С. 29-41.

8. Mironov, A.A. Heat transfer enhancement using oval-trench vortex generators / S.A. Isaev, A.A.Mironov, I.A.Popov, A.N.Skrypnik, A.V.Shelchkov - AIP Conference Proceedings, 2020, p. 080004

9. Mironov A A. Numerical and Physical Simulation of Heat Transfer Enhancement Using Vortex Generators / A A Mironov, S A Isaev, I A Popov, A N Skrypnik, N S Dushin, N I Mikheev. - IOP Journal of Physics: Conference Series, 2020, №1677. P.012022

В прочих научных изданиях:

10. Миронов А.А. Повышение эффективности котлов для сжигания древесных отходов / А.А.Миронов, И.А.Попов, А.Н.Скрыпник, Г.С.Маршалова // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020. № 1 (228). С. 237-246.

В результатах инновационной деятельности:

11. Миронов А.А. Патент на изобретение № 2684303. Российская Федерация, МПК7 F28F 3/04. Теплообменная поверхность / С.А.Исаев, А.И.Леонтьев, П.А.Баранов, И.А.Попов, А.В.Щелчков, Ю.Ф.Гортышов, А.Н.Скрыпник, А.А.Миронов – Опубликовано: 05.04.2019 Бюл. № 10. Приоритет 13.06.2018. – 11 с.

12. Миронов А.А. Патент на изобретение № 2716958. Российская Федерация. МПК7 F28F 3/04. Теплообменная поверхность / Исаев С.А., Баранов П.А., Гортышов Ю.Ф., Леонтьев А.И., Попов И.А., Щелчков А.В., Миронов А.А., Скрыпник А.Н. - Опубликовано: 17.03.2020 Бюл. № 8. Заявка 2019124260, 26.07.2019. – 8 с.

13. . Миронов А.А. Патент на изобретение RU 2768667. Российская Федерация. МПК7 F28F 3/04. Теплообменная поверхность / Исаев С.А., Леонтьев А.И., Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Миронов А.А., Скрыпник А.Н., Аксянов Р.А. – Опубликовано 24.03.2022. Заявка № 2021115548 от 31.05.2021. – 8 с.

В других научных изданиях:

14. Миронов, А.А. Пути повышения эффективности использования выемок как интенсификаторов теплоотдачи / А.В. Щелчков, И.А.Попов, А.А.Миронов // Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: Материалы докладов X школы-семинара молодых ученых и специалистов под рук-м акад.РАН В.Е.Алемасова. Казань: КазНЦ РАН, 2016. с.256-259

15. Миронов, А.А. Обоснование выбора рациональной формы и размеров вихревого интенсификатора теплообмена / Ю.Ф.Гортышов, С.А.Исаев, А.В.Щелчков, И.А.Попов, А.А.Миронов // Международная конференция Национального комитета по теплообмену РАН и школа-семинар молодых ученых и специалистов под рук-вом акад. РАН А.И.Леонтьева. СПб: Изд-во политехнического университета. 2017.

16. Миронов А.А. Комплексные исследования вихревой интенсификации теплообмена / Ю.Ф.Гортышов, С.А.Исаев, А.В.Щелчков, И.А.Попов, А.А.Миронов // Международная конференция «Гидродинамика и теплообмен в закрученных потоках». тезисы доклада. Новосибирск: ИТФ им.С.С.Кутателадзе СО РАН. 2017.

17. Миронов, А.А. Поверхностные вихрегенераторы для интенсификации теплоотдачи / Ю.Ф.Гортышов, И.А.Попов, А.А.Миронов, С.А.Исаев, А.В.Щелчков, Ж.А.Сагидуллин // Труды 7

Российской национальной конференции по теплообмену. В 3х томах: Т.2. – М: Изд-ский дом МЭИ. 2018. С. 398-403.

18. Миронов, А.А. Гидравлическое сопротивление теплообменных каналов с системами выемок различной формы / А.А.Миронов, И.А.Попов // Двенадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машино-строения России» (Москва, 24–27 сентября 2019 г.) : сборник — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — с.517-520.

19. Миронов, А.А. Численное и физическое моделирование интенсификации теплоотдачи с использованием вихревых генераторов – обзор, верификация и рекомендации / А.А.Миронов, С.А.Исаев, А.Н.Скрыпник, И.А. Попов // III Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики». Москва. 19-23 октября 2020. М.: Изд-ский дом МЭИ, 2020. С.191-192

20. Миронов, А.А. Теплоотдача и сопротивление пучков труб с вихрегенераторами / Р.Г.Кадыров, А.А.Миронов, И.А.Попов, Ю.В.Жукова, Г.С.Маршалова, Е.С.Данильчик // XXXVII Сибирский теплофизический семинар. Тезисы докладов. 14 – 16 сентября 2021. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2021. С.47.

21. Миронов, А.А. Повышение теплогидравлической эффективности пучков теплообменных труб с вихрегенераторами / Р.Г.Кадыров, А.А.Миронов, И.А.Попов, Г.С.Маршалова, Ю.В.Жукова, А.Д.Чорный // Тезисы докладов и сообщений. XVI Минский международный форум по тепло- и массообмену, 16–19 мая 2022 г. Т.2. – Минск: Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2022 – с.23-29.

22. Миронов, А.А. Гидродинамика и теплоотдача на поверхностях с вихрегенераторами новых типов // XXVI Туполевские чтения. 9-10 ноября 2023 г. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ. 2023.

23. Миронов, А.А. Усиление интенсификации отрывного течения и теплообмена в профилированной канавке типа бумеранг на пластине при оптимальной длине ориентированной по потоку концевой части / С.А. Исаев, Д.В. Никущенко, И.А. Попов, В.В. Сероштанов, А.А. Миронов, А.А. Клюс // Всероссийская конференция «XL Сибирский теплофизический семинар», 20 – 23 августа 2024, - Новосибирск: ИТ им.С.С.Кутателадзе СО РАН. 2024. С.237.

Всего 32 публикации.

Подписано в печать 14.11.2024. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать ризографическая.

Усл. печ. л. __. Тираж 100. Заказ № ____/__.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92
e-mail: westfalika@inbox.ru
