




МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)



На правах рукописи

ШАКИРОВ РУСЛАН АЙВАРОВИЧ

**ОПТИМАЛЬНЫЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ТЕПЛООБМЕНА**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Казань 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», на кафедре «Автоматизация технологических процессов и производств»

Научный руководитель: **Гильфанов Камиль Хабибович**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», профессор кафедры автоматизации технологических процессов и производств.

Официальные оппоненты: **Щукин Андрей Викторович**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ», профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения;

Ковальногов Владислав Николаевич
доктор технических наук, профессор, член национального комитета РАН по тепломассообмену, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», заведующий кафедрой тепловой и топливной энергетики.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук**, г. Новосибирск.

Защита состоится «15» сентября 2022 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.02 при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (420066, РТ, Казань, ул. Красносельская, д. 51, аудитория Д-224)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д212.082.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на сайте <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/199?idDiss=134>.

Автореферат разослан «24» июня 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.082.02,
кандидат технических наук



Власов Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Энергоэффективность технологических процессов – одна из центральных проблем многих отраслей отечественной промышленности. Технологические процессы любого производства связаны с многократным преобразованием энергии в различных теплообменных устройствах. Поэтому энергоэффективность всего производства напрямую зависит от их эффективности. Стремление к повышению энергоэффективности теплообменного оборудования обуславливает использование различных форм поверхностных пассивных интенсификаторов теплообмена. Интерес к такому типу интенсификаторов продолжает увеличиваться в связи с их уникальными тепловыми и гидравлическими характеристиками. Они позволяют снизить массогабаритные характеристики и значительно повысить эффективность теплообменных устройств.

Степень научной разработанности проблемы. Существует обширная база данных в научно-технической литературе по интенсификации теплообменного оборудования, составляющая около девяти тысяч источников. Исследованиями в области интенсификации трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей занимались российские и зарубежные ученые, область интересов которых **сферические, V-образные, эллиптические, цилиндрические и подковообразные выемки, полусферические, кольцевые и спиральные выступы, спиральные проволочные вставки:** Щелчков А.В., Попов И.А., Исаев С.А., Кикнадзе Г.И., Гачечиладзе И.А., Федоров И.Г., Афанасьев В.Н., Chyu M.K., Терехов В.И., Щукин А.В., Щукин В.К., Гортышов Ю.Ф., Ковальногов В.Н., Ligrani P.M., Хабибуллин И.И., Кесарев В.С., Presser K.H., Mahmood G.I., Нагога Г.П., Леонтьев А.И., Туркин А.В., Мунябин К.Л., Готовский М.А., Burgess N.K., Hwang S.D., Moon H.K., Zhou F., Халатов А.А., Шанин Ю.И., Bunker R.S., Дрейцер Г.А., Калинин Э.К., Мигай В.К., Koch R., Hwang S.D., Миронов О.Н., Легкий В.М., Закиров С.Г., Nunner W., Олимпиев В.В., Bunker R.S., Назмеев Ю.Г., Цынаева А.А. и др. Исследованиями охвачены различные режимы и теплофизические свойства обтекающего потока и стенки с весьма широким спектром опытных и расчетных методов.

Несмотря на большое количество исследований, полученные результаты весьма противоречивы. Существующие результаты обобщения исследований не позволяют проектировать энергоэффективное теплообменное оборудование с интенсифицированными теплообменными поверхностями. Разнообразие геометрических характеристик пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена, а также сложность гидромеханических и тепловых процессов не позволяют обобщить результаты исследований общепринятыми уравнениями сохранения. По результатам некоторых исследований получены обобщающие эмпирические формулы в форме зависимости чисел Нуссельта от чисел Рейнольдса, однако их практическое применение ограничено диапазоном параметров проведенных экспериментов.

Целью работы ставилась разработка метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы, с обеспечением достоверности работы с параметрами за пределами диапазонов экспериментальных исследований, а также способа интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования.

Задачи исследования, решаемые для достижения поставленной цели:

1. Определение геометрических и теплофизических факторов поверхностной интенсификации теплообмена, влияющих на тепловые и гидромеханические характеристики теплообменного оборудования. Фашификация объекта исследования.

2. Создание базы данных по геометрическим и режимным характеристикам пассивных интенсификаторов трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей с учетом конкретных теплофизических и гидромеханических условий экспериментальных исследований различных авторов. Нормализация параметров сформированной базы данных.

3. Разработка методики обобщения результатов экспериментальных исследований в области повышения энергоэффективности поверхностных теплообменных устройств.

4. Реализация алгоритмов обучения и формирования искусственной нейронной сети (далее – ИНС) для исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена.

5. Разработка прикладного программного обеспечения нейросетевого моделирования (далее – НС-моделирование) эффективности теплообмена, гидравлического сопротивления и теплогидравлической эффективности трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами теплообмена различной формы.

6. Анализ согласования полученных результатов в диапазоне параметров экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена.

7. Разработка способа интенсификации по режимным характеристикам трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств.

8. Разработка компьютерной модели оптимальных поверхностей теплообмена в целом и геометрических характеристик для каждого типа поверхностных интенсификаторов.

Методы исследования. Для реализации метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных теплообменных устройств с интенсификаторами различной формы требуются методы, позволяющие обобщить результаты всех экспериментальных исследований в данной области и работать за их пределами. Одним из таких

методов является НС-моделирование, которое позволяет сформировать взаимосвязи между тепловыми и гидромеханическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена. Это дает возможность работать с данными, не вошедшими в диапазон параметров экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообменного оборудования и обобщить их результаты.

Для решения задач диссертационного исследования использованы методы системного анализа, математического моделирования, ИНС, методы оптимизации – стохастический градиентный спуск, бутстрэпирования, ROC-анализа, объектно-ориентированного программирования. Построение модели ИНС осуществлялось посредством написания программного кода на языке Python 3.7, с применением библиотек Keras и TensorFlow.

Объект исследования: теплообменное оборудование с трубчатыми и пластинчатыми теплообменными поверхностями с пассивными интенсификаторами различной формы.

Предметом исследования являются теплогидравлические характеристики трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей с различными типами пассивных интенсификаторов теплообмена, оптимальные комплексные теплофизические и гидромеханические процессы, их обобщение в форме компьютерной программы для повышения энергоэффективности поверхностных теплообменных устройств.

Соответствие диссертации паспорту специальности 01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника» по формуле специальности: исследования по процессам переноса тепла и массы в сплошных средах; имеющие целью обоснование методов расчета термодинамических и переносных свойств в различном агрегатном состоянии, выявление механизмов переноса массы, импульса и энергии при конвекции; обоснование и проверка методов интенсификации тепло- и массообмена и тепловой защиты. По областям исследований:

п. 5: «Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей» - установление геометрических и теплофизических факторов, действующих на тепловые и гидромеханические характеристики поверхностных пассивных интенсификаторов теплообмена, разработка метода исследования, проведение фазификации объекта исследования;

п. 9: «Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты» - разработка компьютерной модели оптимальных поверхностей в целом и для каждого типа поверхностных интенсификаторов, разработка способа интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного устройства.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые разработан метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и

геометрических характеристик трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы, который позволяет работать с параметрами за пределами диапазонов экспериментальных исследований.

2. Разработан способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования.

3. Впервые разработана методика НС-моделирования энергоэффективности трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами теплообмена в виде сферических, V-образных, эллиптических, цилиндрических и подковообразных выемок, а также полусферических, кольцевых и спиральных выступов и проволочных вставок.

4. Сформирована база данных по характеристикам пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена с учетом конкретных теплофизических и гидромеханических условий экспериментальных исследований.

5. Произведено обучение ИНС и тестирование выборки по относительным коэффициентам теплообмена, гидравлического сопротивления и теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена, что впервые позволило установить характерные логические взаимосвязи между режимными и геометрическими параметрами трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств.

6. Произведена оптимизация интенсифицированной поверхности теплообменного оборудования по тепловым и гидравлическим критериям.

7. Впервые произведено обобщение результатов экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы, который позволяет работать с параметрами за пределами диапазонов экспериментальных исследований. Также в разработке методики НС-моделирования тепловой эффективности, гидравлического сопротивления, теплогидравлической эффективности трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств, геометрических и режимных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена.

Практическая значимость результатов диссертационной работы обуславливается разработкой способа интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования, а также разработкой комплекса прикладных программ, реализующих предложенный метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной

формы. Полученные результаты позволяют проектировать энергоэффективные теплообменные аппараты, отличающиеся уменьшенными массогабаритными параметрами. Предложенный способ интенсификации используется для обеспечения энергоэффективного теплообмена между охлаждающим воздухом и сжатим природным газом.

Диссертационная работа выполнялась в рамках гранта имени С.А. Оруджева (2021 г.) – ПАО «Газпром».

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов компьютерного и математического моделирования, сравнением результатов НС-моделирования с фактическими значениями экспериментальных исследований.

Автор защищает:

1. Метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы.

2. Способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного устройства.

3. Базу данных экспериментальных исследований по теплообмену и гидравлическому сопротивлению для сферических, цилиндрических, V-образных, эллиптических и подковообразных выемок, полусферических, кольцевых и спиральных выступов, спиральных проволочных вставок.

4. Методику подготовки и формирования экспериментальных данных исследований пассивной интенсификации теплообменного оборудования, а также фазификацию объекта исследования по тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности.

5. Методику обобщения результатов экспериментальных исследований пассивной поверхностной интенсификации трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств.

6. Результаты исследования и их согласование с результатами экспериментальных исследований.

7. Результаты НС-моделирования тепловой эффективности, гидравлического сопротивления и энергоэффективности поверхностных теплообменных аппаратов, режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена, а также результаты оптимизации поверхностной интенсификации теплообмена в среде ИНС.

8. Программное обеспечение, реализующее предложенные в диссертационной работе методы и алгоритмы, позволяющие обобщить результаты экспериментальных исследований и установить взаимосвязи между тепловыми и гидромеханическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена.

Реализация результатов работы. Результаты исследования включая сформированную базу экспериментальных исследований по теплообмену и гидравлическому сопротивлению, разработанную нейросетевую модель поверхностной интенсификации теплообмена, результаты НС-моделирования

тепловых и гидромеханических характеристик поверхностных интенсификаторов применяются в инновационной и производственной деятельности ООО «Газпром трансгаз Чайковский». Разработанный по результатам диссертационного исследования способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками реализован и применяется для определения оптимальных режимных характеристик устройства охлаждения компримированного природного газа на выходе компрессорной станции.

Личный вклад автора. Основные результаты получены автором лично под руководством д.т.н., проф. Гильфанова К.Х.

Апробация работы. Основные результаты опубликованы и обсуждались на 13 конференциях: XVI Производственно-техническая конференция молодых ученых и специалистов ООО «Газпром трансгаз Уфа» (г. Уфа, 17 декабря 2020 г.), XXXIII Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (г. Казань 14-18 сентября 2020 г.), Международный молодежный научный форум «Ломоносов» (г. Москва 13-17 апреля 2020 г.), X Научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов "Новые направления и тренды в инновационной деятельности на предприятиях газовой промышленности ООО "Газпром трансгаз Казань" (г. Казань, 12-14 декабря 2019 г.), XXIV Международная молодежная научная конференция «XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (г. Казань, 7–8 ноября 2019 г.), Международная научно-техническая конференция "Интеллектуальные энергетические системы" (г. Казань, 18-20 сентября 2019 г.), XIV Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 25 мая 2019 г.), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (г. Москва, 08 апреля 2019 г.), XII научно – техническая конференция молодых ученых и специалистов ООО «Газпром трансгаз Чайковский» (г. Чайковский, 4-5 декабря 2018 г.), III Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии» (г. Альметьевск, 14-17 ноября 2018 г.), Международная научно-практическая конференция «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (г. Альметьевск, 14-17 ноября 2018 г.), X Международная научно-практическая конференция «Водно-энергетический форум» (г. Казань, 2 ноября 2018 г.).

Публикации. Основное содержание работы изложено в 13 публикациях, из которых: 2 в рецензируемых журналах из перечня ВАК МОН РФ, 3 зарегистрированы в базе данных Scopus/Web of Science, 8 в журналах, зарегистрированных в РИНЦ. В Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент) зарегистрированы 3 программы для ЭВМ.

Содержание и объем работ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованных источников из 170 наименований и приложений. Работа изложена на 185 страницах машинописного текста и включает 85 рисунка, 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, изложена научная новизна, цели и задачи исследования, степень научной разработанности, методы исследования, практическая и теоретическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена литературному обзору экспериментальных исследований энергоэффективности теплообменных устройств с пассивными интенсификаторами трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей. Проведен анализ исследований поверхностной интенсификации теплообмена вихрегенераторами в форме сферических, цилиндрических, V-образных, эллиптических, и подковообразных выемок, полусферических, кольцевых и спиральных выступов. Представлены результаты экспериментальных исследований. Установлено, что в качестве количественной оценки изменения теплообмена, гидравлического сопротивления и теплогидравлической эффективности предлагаются отношения вида Nu/Nu_0 , ξ/ξ_0 и $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$, где индекс $_0$ относится к параметру с гладкой поверхностью.

Интенсификаторы теплообмена в форме **сферических выемок** вызвали повышенный интерес исследователей в связи с более ранним (по сравнению с гладкими поверхностями при тех же гидромеханических условиях) ламинарно-турбулентным переходом и более поздним отрывом потока от стенки. По результатам анализа экспериментальных исследований установлено, что сферические выемки на плоских и цилиндрических поверхностях при их продольном обтекании приводят к росту гидравлического сопротивления в $\xi/\xi_0 = 1,25 \div 2,5$ раза. Интенсификация теплообмена поверхностей с системами сферических выемок достигает $Nu/Nu_0 = 3,7$ раза при турбулентном режиме течения. Диапазон чисел Рейнольдса рассмотренных исследований составил $Re_D = 200 \div 7 \cdot 10^6$.

Основная часть работ по теплоотдаче и гидросопротивлению каналов с **кольцевыми выступами** проведена для турбулентного режима течения, а ламинарный и переходный режимы течения охвачены весьма ограниченно. Диапазон исследованных теплофизических характеристик потока составляет $Re_D = 30 \div 4 \cdot 10^5$, $Pr = 0,7 \div 320$, геометрические размеры $d/D = 0,5 \div 0,92$, $t/D = 0,16 \div 19,6$. Интенсификация теплообмена при турбулентном режиме течения достигает до $Nu/Nu_0 = 9,5$ раз, при этом наблюдается значительный рост гидравлического сопротивления до в $\xi/\xi_0 = 211,9$ раз. Результаты исследований по данному типу интенсификаторов противоречивы. Исследовательской группой Э.К. Калинина, Э.Г. Дрейцера и др. для труб с кольцевыми выступами установлены зависимости относительного коэффициента теплообмена:

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \left(1 + \frac{\lg Re_f - 4,6}{30} \right) \cdot [(3,33t/d - 16,33)d/D + 17,33 - 3,33t/D], \quad (1)$$

в диапазоне параметров $Re_D = 10^4 \div 4 \cdot 10^5$, $Pr = 0,7 \div 50$, $d/D = 0,88 \div 0,98$, $t/D = 0,8 \div 2,5$ и относительных коэффициентов гидравлического сопротивления:

$$\frac{\xi}{\xi_0} = \left[1 + \frac{100(\lg \text{Re}_f - 4,6)(1 - d/D)^{1,65}}{\exp(t/D)^{0,3}} \right] \cdot \exp \left[\frac{25(1 - d/D)^{1,32}}{(t/D)^{0,75}} \right], \quad (2)$$

в пределах $d/D = 0,9 \div 0,97$, $t/D = 0,5 \div 10$.

Имеются аналогичные обобщающие зависимости в виде эмпирических формул, предлагаемые авторами большинства исследований. Формулы ограничены геометрическими и теплофизическими условиями проведения несистематических экспериментов.

Одним из главных преимуществ поверхностных интенсификаторов теплообмена в форме **полусферических выступов**, является возможность получить значительный положительный эффект, не сужая проходное сечение трубы. Диапазон исследований составляет $\text{Re}_D = 1000 \div 1,5 \cdot 10^5$, $\text{Pr} = 0,7 \div 7$, $d/D = 0,639 \div 0,94$, $t/D = 0,482 \div 0,843$. Увеличение средней теплоотдачи в 3,7 раз по сравнению с гладким каналом, сопровождается с увеличением коэффициента гидравлического сопротивления в 20 раз. По результатам экспериментальных исследований получены обобщающие зависимости по гидросопротивлению и средней теплоотдаче для турбулентного отрывного обтекания поверхности при $\text{Re}_h = 530 \div 16000$; $H/D = 0,7 \div 1,68$; $h/D = 0,21 \div 0,5$.

Анализ результатов исследований, показывает, что несмотря на обилие исследовательского материала по осредненным и локальным характеристикам течения и теплоотдачи в каналах с поверхностными интенсификаторами различной формы, практически отсутствуют инженерные рекомендации и методики расчетного прогнозирования теплогидравлических характеристик. Имеющиеся данные об уровне интенсификации довольно противоречивы.

Во второй главе представлены этапы разработки метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы, основанный на выявлении взаимосвязей между режимными и геометрическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена. Для реализации метода разработаны методики формирования и подготовки базы параметров экспериментальных исследований пассивной интенсификации теплообмена, а также метод и алгоритм формирования и оптимизации ИНС для НС-моделирования поверхностной интенсификации теплообмена. Представлена разработка нейросетевой модели оптимальных характеристик поверхностных интенсификаторов, результаты оценки точности и методики оптимизации ИНС. Представлена разработка инструментального программного обеспечения реализующий предложенный метод: назначение, средства разработки, описание основных объектов, классов и методов, особенности реализации, структура и описание программного кода. Представлено функционирование инструментального программного обеспечения.

Формирование взаимосвязей и выявление из них скрытых закономерностей, позволяет построить нейросетевую модель поверхностной

интенсификации теплообмена. Для обобщения опытных данных на основе поиска закономерностей предложен алгоритм построения нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена.

Фрагмент обучающей выборки экспериментальных параметров для сферических выемок представлен в табл. 1, где h , d – глубина и диаметр выемки; H – высота теплообменной поверхности; Pr , Re – числа Прандтля и Рейнольдса; Nu – число Нуссельта для интенсифицированной поверхности, Nu_0 – число Нуссельта для гладкой поверхности.

Таблица 1

Выборка базы экспериментальных параметров для сферических выемок

h , м	d , м	H , м	h/d	H/d	h/H	Pr	Re_D	(Nu/Nu_0)
0,00071	0,00514	0,01	0,138	1,945	0,071	0,686	280	1
0,005	0,01	0,002	0,5	0,2	2,5	0,687	300	1,6

Произведена фазификация объекта исследования и нормализация входных и выходных параметров. Формирование тестовой и обучающей выборки производится на базе метода 0,632-бутстрэпа. Минимизировано влияние погрешности результатов экспериментальных исследований на результаты НС-моделирования путем вычистки аномальных значений и оценкой влияния на формирование характерных взаимосвязей между характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена.

Для вычисления ошибки классификации на обучающем E_{train} и тестовом наборе E_{test} использована среднеквадратическая ошибка потери

$$E_{train} = E_{test} = MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_t - y_p)^2, \quad (3)$$

где n – объем обучающей или тестовой выборки; y_t – истинное значение; y_p – прогнозируемое значение ИНС (результат работы ИНС).

Нейросетевая модель реализована на базе языка программирования Python v.3.7, в основе которого заложены вышеописанные методы. Для решения задачи НС-моделирования поверхностной интенсификации теплообмена использовались следующие библиотеки: NumPy, TensorFlow, Pandas, Keras, Matplotlib.

В третьей главе представлены полученные результаты исследования тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности пластинчатых и трубчатых теплообменных устройств, а также описание разработанного прикладного программного обеспечения, позволяющего реализовать разработанный метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик. Результаты апробирования методов, предложенных в диссертационной работе. Представлены результаты НС-моделирования эффективности теплообмена при поверхностной интенсификации, оптимизации поверхностной интенсификации теплообмена, а также режимных и геометрических характеристик для следующих типов поверхностных интенсификаторов теплообмена: кольцевые, полусферические выступы, сферические, капельные, V-образные, эллиптические, подковообразные, цилиндрические выемки и спиральные проволочные

вставки. Для вышеописанных типов поверхностных интенсификаторов получены оптимальные характеристики в пределах и за пределами теплофизических и гидромеханических условий экспериментальных исследований. Выполнен анализ согласования полученных результатов с характеристиками поверхностных интенсификаторов экспериментальных исследований, результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оптимальные характеристики поверхностных теплообменных устройств с интенсификаторами теплообмена в виде кольцевых выступов

Кольцевые выступы										Источник Э. К. Калинин «Эффективные поверхности теплообмена»
d/D	t/D	t/h	Pr	Re_D	d/D	t/D	t/h	Pr	Re_D	
Фактические значения					НС – моделирование					
Ламинарный режим ($Re_D < 600$)										
0,97	1	66,6	3,56	650	0,967	1,07	66,4	3,43	647	Nu/Nu ₀
0,978	0,25	22,73	3,56	650	0,974	0,24	22,7	3,51	651	ξ/ξ_0
0,97	0,25	22,73	3,56	650	0,971	0,22	22,64	3,59	648	(Nu/Nu ₀)/(ξ/ξ_0)
Переходной режим ($Re_D = 700 \div 3,5 \cdot 10^3$)										
0,875	0,496	3,968	8,82	2510	0,877	0,499	4,01	8,76	2487	Nu/Nu ₀
0,983	0,496	29,17	2,94	1580	0,985	0,488	29,05	2,72	1563	ξ/ξ_0
0,94	0,99	18,5	11,76	3160	0,942	0,991	18,61	11,82	3154	(Nu/Nu ₀)/(ξ/ξ_0)
Турбулентный режим ($Re_D > 3,5 \cdot 10^3$)										
0,74	1	7,5	3,56	4000	0,739	0,99	7,61	3,53	3985	Nu/Nu ₀
0,967	0,944	28,6	20,58	6300	0,967	0,93	28,05	20,01	6257	ξ/ξ_0
0,983	0,496	29,1	47	50000	0,989	0,492	29,24	46,8	49967	(Nu/Nu ₀)/(ξ/ξ_0)

По результатам НС-моделирования установлено, что при низких числах Рейнольдса Re_D кольцевые выступы приводят к увеличению теплоотдачи Nu/Nu_0 при опережающем росте гидравлического сопротивления ξ/ξ_0 . Это приводит к тому, что в некоторых случаях, уровень теплоотдачи ниже, чем в гладкой трубе. В области переходных числах Рейнольдса Re_D выявлена значительная зависимость теплогидравлической эффективности $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ поверхностной интенсификации от высоты выступов h . Увеличение относительного шага t/D приводит к падению гидравлического сопротивления. Максимальное увеличение теплогидравлической эффективности наблюдается при турбулентном режиме.

В четвертой главе предложен способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств, представлены этапы и результаты реализации предложенного способа. Установлены оптимальные геометрические и режимные характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена для проектирования энергоэффективных теплообменных аппаратов. Оптимальные характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена получены по результатам предложенного метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена.

В табл. 3 представлены полученные оптимальные относительные

геометрические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена для трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств.

Таблица 3

Оптимальные относительные параметры характеристик теплообменных устройств с интенсификаторами различной формы

Кольцевые выступы			Спиральные проволочные вставки		
d/D	t/D	t/h	h/D	t/h	h/s
0,94÷0,98	0,5÷1	42÷84	0,74÷0,8	0,9÷0,94	0,4÷0,5
Сферические выемки			Полусферические выступы		
h/D	H/D	h/H	d/D	t/D	s/D
0,32÷0,5	0,97÷1,9	0,41÷0,6	0,83÷0,92	0,86÷0,9	0,55÷0,6
Цилиндрические выемки			Эллиптические выемки		
$s, м$	$t, м$	h/d	h/d	t/d	s/d
0,1÷0,2	0,7÷0,9	1÷2	0,2÷0,5	2÷3	1,25÷2
Подковообразные выемки			Капельные углубления		
h/d	t/d	s/d	h/d	t/d	s/d
0,17÷0,19	4,3÷5	1,1÷2,1	0,1÷0,2	2,16÷2,3	1,25÷2

По результатам исследования тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности поверхностных теплообменных устройств предложенным методом установлено, что полусферические выступы обеспечивают максимальную теплогидравлическую эффективность в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_D = 10^3 \div 7 \cdot 10^3$.

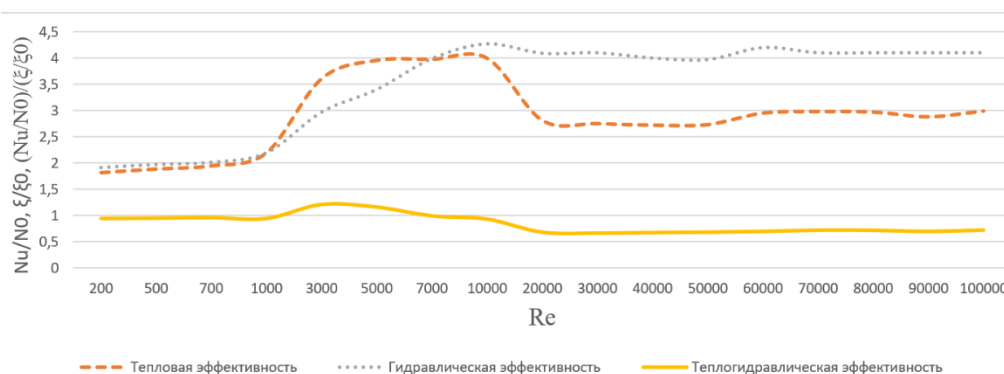


Рисунок 1 – Результаты исследования поверхностной интенсификации полусферическими выступами

Полученные результаты исследования и установленные взаимосвязи между геометрическими и режимными характеристиками интенсификаторов теплообмена позволяют реализовать способ интенсификации теплообмена, основанный на интеллектуальном управлении режимными характеристиками поверхностного теплообменного оборудования, что позволяет обеспечивать энергоэффективность трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Таким образом, разработанные методы и алгоритмы в данной диссертационной работе позволяют реализовать метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными

интенсификаторами различной формы, который позволяет работать с параметрами за пределами диапазонов экспериментальных исследований, а также способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного устройства.

1. По результатам анализа литературных источников в области интенсификации теплообменного оборудования определены геометрические и теплофизические факторы пассивной поверхностной интенсификации теплообмена, действующие на тепловые и гидромеханические характеристики теплообменных устройств (фазификация объекта исследования).

2. Разработана методика сбора и подготовки исходных данных к анализу. Сформирована обширная база данных, включающая 3500 значений параметров поверхностных интенсификаторов трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей с учетом конкретных теплофизических и гидромеханических условий экспериментальных исследований.

3. Разработана методика обобщения результатов экспериментальных исследований пассивной интенсификации поверхностных теплообменных устройств, который позволяет значительно расширить рабочий диапазон геометрических и теплофизических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Методика основана на анализе изменения установленных взаимосвязей между характеристиками поверхностных интенсификаторов трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств.

4. Реализован алгоритм обучения и формирования ИНС пассивной интенсификации теплообмена для исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы. ИНС позволяет сформировать характерные взаимосвязи между всеми тепловыми и гидромеханическими параметрами поверхностных интенсификаторов теплообмена.

5. Разработан комплекс прикладных программ (далее – ПП), реализующие предложенный метод исследования. ПП позволяют получить прогнозные значения тепловой, гидравлической или теплогидравлической эффективности, значения параметров режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. ПП могут использоваться при проектировании и модернизации теплообменных устройств, с целью повышения энергоэффективности. Предложенный комплекс программ позволяет получить оптимальные характеристики по заданным пользователем параметрам.

6. Выполнен анализ согласования полученных результатов в диапазоне параметров экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена. Результаты исследования положительно согласовываются с результатами экспериментальных исследований. Это позволяет сделать вывод, что результаты НС-моделирования для характеристик поверхностной интенсификации вне диапазона проведенных экспериментальных исследований с высокой точностью характеризуют эффективность пассивной поверхностной интенсификации теплообмена.

7. Разработанный способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования используется при охлаждении компримированного природного газа на выходе компрессорной станции с помощью АВО газа. Установлено, что реализация предложенного способа позволяет сократить потребление электроэнергии АВО от 34 до 77 %.

8. Предложена компьютерная модель оптимальных поверхностей в целом и геометрических характеристик для каждого типа поверхностных интенсификаторов теплообменных поверхностей трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств. Установленные оптимальные характеристики удовлетворительно согласуются с результатами экспериментальных исследований. Получены оптимальные характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена за пределами теплофизических и гидромеханических условий экспериментальных исследований.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых журналах из перечня ВАК МОН РФ:

1. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А. Нейросетевое моделирование теплообменных характеристик при поверхностной интенсификации теплообменного оборудования /Вестник КГТУ, Казань:, КНИТУ им. А.Н. Туполева, 2020, Том 76, № 4. - С. 5-11

2. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А. Нейросетевое моделирование теплогидравлической эффективности перспективных поверхностных интенсификаторов теплообмена /Изв. Вузов «Авиационная техника, Казань:», КНИТУ им. А.Н. Туполева, 2021, № 1. - С. 57-65

Научные статьи, опубликованные в базе данных Scopus/Web of Science:

1. K.K. Gilfanov, R.A. Shakirov. Intellectual modeling of surface heat-exchange enhancer based on artificial neural networks // International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019) Web of Conf., 124 (25 October 2019).

2. K Kh Gilfanov, R A Shakirov. Neural network modeling of surface heat transfer intensifiers in the form of segment recesses / International Scientific and Practical Conference: Water Power Energy Forum 2018. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 288 (2019) 012087.

3. K.Kh. Gil'fanov, R.A. Shakirov. Neural network modeling of thermal-hydraulic efficiency of promising surface heat transfer intensifiers, Russian Aeronautics, Volume 64, pp 61-70.

Научные статьи в журналах, зарегистрированных в РИНЦ:

1. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А., Нейросетевая модель расчета геометрических параметров поверхностных интенсификаторов теплообмена/Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов - 2020» [Электронный ресурс] / Отв.ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. – М: МАКС Пресс, 2020.

2. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А., НС-моделирование поверхностной

интенсификации теплообменного оборудования/сборник трудов Международной научной конференции Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-33/ Т. 12, Ч.1, С 81-84.

3. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А., НС-моделирование поверхностных интенсификаторов теплообмена. Материалы III Международной научно-практической конференции молодых ученых «Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии»., 2018, АГНИ, С. 373-377.

4. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А., Нейросетевое моделирование поверхностных интенсификаторов теплообмена. Материалы Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли»., 2018. С. 527-531.

5. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А., НС-моделирование поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде кольцевых выступов XXIV Туполевские чтения: Международная молодёжная научная конференция, 7–8 ноября 2019 года: Материалы конференции. Сборник докладов. – В 6 т.; Т. 2. – Казань: изд-во ИП Сагиева А.Р., 2019. – 302-307 с.

6. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А., Гайнуллин Р.Н. Нейросетевое моделирование характеристик дискретно–шероховатых поверхностей теплообмена в виде лунок. Материалы XIV Международной молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения». В 3-х томах. Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. 2019. Изд-во: КГЭУ (Казань) С. 251-258.

7. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А., Интенсификация теплообменного оборудования инновационными методами интеллектуального моделирования. Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ. Материалы VI Национальной НПК, в 2 т. Казань, 2020. С. 127-129.

8. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А. Нейросетевое моделирование поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде кольцевых и полусферических выступов // Моделирование энергоинформационных процессов [Электронный ресурс]: / Сборник статей VIII национальной научно-практической конференции с международным участием (24-26.12.2019). - Воронеж. гос. ун-т инж. технол. – Воронеж: ВГУИТ, 2020. - 535 с. С. 320-326

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1. Шакиров Р.А., Гильфанов К.Х., Свидетельство о государственной регистрации №2022615393 НС-моделирование тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена. Дата государственной регистрации 31.03.2022 г.

2. Шакиров Р.А., Гильфанов К.Х., Свидетельство о государственной регистрации №2022615175 НС-моделирование режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Дата государственной регистрации 30.03.2022 г.

3. Шакиров Р.А., Гильфанов К.Х., Свидетельство о государственной регистрации №2022615056 Оптимизация поверхностной интенсификации теплообмена в среде ИНС. Дата государственной регистрации 29.03.2022 г.