



УТВЕРЖДАЮ

И.Ф. директор Института теплофизики им. С.С.

Кутателадзе СО РАН

Академик РАН Маркович Д.М.

08 2022 г.

М.П.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук на диссертацию Шакирова Руслана Айваровича «Оптимальные теплогидравлические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Диссертационная работа Р.А. Шакирова «Оптимальные теплогидравлические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена» содержит оригинальные результаты по исследованию однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик поверхностных теплообменных устройств с пассивными интенсификаторами в виде сферических, V-образных, эллиптических, цилиндрических и подковообразных выемок, полусферических, кольцевых и спиральных выступов. Основное внимание в работе уделено повышению энергоэффективности трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств за счет выявления обобщающих характеристик при поверхностной интенсификации теплообмена путем нейросетевого моделирования. Разработан метод исследования и способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования.

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена необходимостью разработки новых методов исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена, основанных на обобщении результатов экспериментальных исследований в данной предметной области и установлении обобщающих характеристик.

Пассивные поверхностные интенсификаторы теплообмена продолжают вызывать повышенный интерес исследователей по всему миру, в связи с их уникальными тепловыми и гидравлическими характеристиками. В научно-технической литературе имеется огромная база экспериментальных и численных исследований в данной области, результаты которых весьма противоречивы, поскольку эмпирические математические модели разных исследователей справедливы только в диапазонах опытов, при различных граничных условиях и выполнены с использованием оборудования с различными метрологическими характеристиками. Расчет оптимальных характеристик интенсифицированных поверхностей предполагает знание обобщенной математической модели в виде

функционалов оптимизации от факторов влияния. К сожалению, традиционный подход не позволяет получить корректные единые обобщенные взаимозависимости для описания процессов интенсификации.

Основной целью диссертационной работы является 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. В работе для достижения этой цели последовательно решаются следующие задачи: определение геометрических и теплофизических факторов поверхностной интенсификации теплообмена, влияющих на тепловые и гидромеханические характеристики теплообменного оборудования; 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; разработка методики обобщения результатов экспериментальных исследований в области повышения энергоэффективности поверхностных теплообменных устройств; реализация алгоритмов обучения и формирования искусственной нейронной сети для реализации метода исследования и разработка прикладного программного обеспечения для практической реализации результатов исследования; анализ согласования полученных результатов в диапазоне параметров экспериментальных исследований; разработка способа интенсификации по режимным характеристикам трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств; разработка компьютерной модели оптимальных поверхностей теплообмена в целом и геометрических характеристик для каждого типа поверхностных интенсификаторов.

Общая характеристика работы

Диссертация Р.А. Шакирова «Оптимальные теплогидравлические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена» имеет классическую структуру и состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованных источников из 170 наименований и приложений. Работа изложена на 184 страницах машинописного текста и включает 85 рисунка, 28 таблиц. Диссертация и автореферат написаны в соответствии с общими методологическими принципами научного исследования.

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.

В **первой главе** приведен обзор научной литературы по современному состоянию 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. Показаны

основные способы пассивной интенсификации теплообмена для повышения энергоэффективности поверхностных теплообменных устройств. По результатам анализа установлены геометрические и теплофизические факторы поверхностной интенсификации теплообмена, влияющих на тепловые и гидромеханические характеристики теплообменного оборудования. На основе проведенного анализа были сформулированы выводы позволяющие сформулировать основные задачи и содержание настоящей диссертационной работы.

Этапы разработки метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами теплообмена различной формы показаны во **второй главе**. Производится описание методики формирования и подготовки базы параметров экспериментальных исследований пассивной интенсификации теплообмена, а также метод и алгоритм формирования и оптимизации искусственной нейронной сети. Представлены этапы разработка нейросетевой модели оптимальных характеристик поверхностных интенсификаторов. Производится описание разработанного инструментального программного обеспечения, реализующий предложенный метод: назначение, средства разработки, описание основных объектов, классов и методов, особенности реализации, структура и описание программного кода.

В **третьей главе** представлены полученные результаты исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы, анализ согласования полученных результатов с экспериментальными исследованиями, а также описание разработанного прикладного программного обеспечения, реализующего предложенный метод исследования. 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 различных типов поверхностных интенсификаторов теплообмена. Выполнен анализ согласования полученных результатов с характеристиками поверхностных интенсификаторов экспериментальных исследований.

Результаты исследования энергоэффективности поверхностных теплообменных устройств с пассивными интенсификаторами различной формы, а также оптимальные геометрические и режимные характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена позволяющие проектировать энергоэффективные теплообменные устройства приведены в **четвертой главе**. 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. Предложен способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования, который обеспечивает энергоэффективный теплообмен в трубчатых и пластинчатых теплообменных устройствах.

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Научная новизна и достоверность результатов

Научная новизна диссертационной работы Шакирова Р.А. заключается в разработке метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена, а также способа интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования; в разработке методики нейросетевого 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 проволоочных вставок; Помимо этого, сформирована база данных по характеристикам пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена с учетом конкретных теплофизических и гидромеханических условий экспериментальных исследований, а также произведено обобщение результатов экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена и оптимизация интенсифицированной поверхности теплообменного оборудования по тепловым и гидравлическим критериям.

Достоверность приведенных результатов и выводов подтверждается использованием апробированных методов компьютерного и математического моделирования. Для подтверждения полученных результатов нейросетевого моделирования тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена проведена верификация полученных данных в том же диапазоне тепловых и гидромеханических условий экспериментальных исследований. Анализ согласования полученных результатов исследования в диапазоне параметров экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена показал, что результаты исследования положительно согласовываются с результатами экспериментальных исследований в установленных диапазонах режимных и геометрических характеристик.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы показывают, что разработанный метод исследования позволяет обобщить результаты экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена и установить оптимальные режимные и геометрические характеристики трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей. 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.

Практическая значимость результатов диссертационной работы обуславливается разработкой способа интенсификации теплообмена, позволяющего обеспечить энергоэффективный теплообмен при эксплуатации теплообменного оборудования, а также разработкой комплекса прикладных программ, реализующих предложенный метод

исследования и позволяющий проектировать энергоэффективные теплообменные аппараты.

Методология и методы исследования

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.

Общая характеристика работы и публикации по теме диссертации

Основные научные результаты по теме диссертационного исследования с необходимой полнотой опубликованы 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, 13 докладов на международных и всероссийских научных конференциях.

Замечания по диссертационной работе

1. В разделе 2.3.1 главы 2 описан процесс нормализации экспериментальных данных, используемых для ускорения обучения моделей. При этом выбор названий переменных в формулах (2.1)-(2.4) непоследовательный и запутывает читателя, так как буквенные обозначения входных и выходных данных меняются местами. Хорошо бы иметь единый список обозначений сквозной для всего текста диссертации.
2. В разделе 2.4.2 главы 2 диссертации описаны используемые методы регрессионного анализа для параметров вынужденной конвекции для использования в трубчатых и пластинчатых теплообменниках. Регрессионные модели строились с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС). При этом структура ИНС определяется согласно теореме Колмогорова – Арнольда – Хехт – Нильсена с одним скрытым слоем из $2N+1$ нейронов, где N – размер входного слоя. В этом случае такая структура ИНС может быть неоптимальной, поэтому исследователи выполняют оптимизацию структуры сети (гиперпараметров), например алгоритмом Hyperband или перебором с поиском по решетке, для определения оптимальной структуры сети, которая позволяет снизить ошибку регрессора для оценки целевого параметра, независимо от выбора алгоритма оптимизации самих весов ИНС.
3. Так же в разделе 2.4.4 выполнена оценка качества разработанных моделей для разных типов интенсификаторов теплообмена. При этом использовался ROC-анализ, который обычно применяется для анализа качества полученной логистической регрессии или классификации, когда результатом является явное разделение пространства решений, например на два класса. В данном случае решением является непрерывное значение эффективности или значение параметра геометрических или режимных характеристик и разбиение на классы выглядит несколько искусственно. Сравнение моделей по точности предсказания, например в процентах, как в Таблице 2.13, представляется достаточным.
4. В главе 3 работы, где описываются три разработанные программы, не до конца ясным остается, что такое наилучшие оптимальные взаимосвязи между всеми параметрами

тестовой выборки характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена и как они определяются. Возможно это подмножество экспериментальных данных, которые моделируются ИНС наиболее близко к самим экспериментальным данным. Стоило бы привести примеры и подробнее расписать, что это такое, так как они используются во всех трех программах, которые являются основными результатами диссертации позволяющими делать физические выводы о конфигурациях теплообменных устройств.

5. В диссертации на стр. 54 и 94 указано, что нейронная сеть имеет 10-14 входных нейронов, а на стр. 65 и 95 приведено, что обучающая выборка представляет собой матрицу из 9-16 столбцов. Получается, что данных может быть меньше, чем входов.

6. Теплогидравлический параметр $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ считается как локальный или интегральный параметр? Об этом в тексте диссертации ничего не говорится. Если локальный, то в какой точке для какого ряда интенсификаторов, если интегральный, то какова была площадь поверхности осреднения? Чаще всего используется интегральный параметр.

7. Не представлены полные данные по выборкам данных экспериментов для обучения искусственной нейронной сети (ИНС). Как и кем определялось какие именно данные нужно использовать при обучении алгоритма ИНС, а какие нет? Например, на стр. 111 написано, что данные измерений [64] не были использованы при обучении ИНС по теплообмену. Аналогично для гидравлического сопротивления не были использованы данные [87] (см. на стр. 113). На основании чего был сделан такой вывод?

8. Данные, приведенные в Табл. 3.1 (стр. 110), 3.2 (стр. 115) и 3.3 (стр. 118) сложны для интерпретирования, так как на них не указаны режимные параметры, геометрия течения и тип теплоносителя. Также совершенно не ясно как было получено столь прекрасное согласие (не более 3% по данным автора) между данными большого количества работ других авторов и ИНС диссертанта.

9. В автореферате и в тексте самой диссертации нет расчетных схем теплообменных каналов при наличии установленных элементов макрошероховатости (пассивные интенсификаторы теплопереноса). Также нет списка используемых обозначений. Это заметно усложняет понимание и интерпретацию исходных данных при проведении оптимизационных расчетов ИНС.

10. Не ясно зачем проводить оптимизацию с использованием ИНС числа Прандтля. По сути, это, во-первых, исходный теплофизический параметр и, во-вторых, это практически табличное значение. Зачем и как его оптимизировать и как это возможно на практике? Диссертант проводил оптимизацию коэффициентов кинематической вязкости и температуропроводности теплоносителя для воздуха, вода и водо-глицериновой смеси? Понятно, как это можно реализовать для смеси, но как это выполнить для чистых жидкостей? Также в работе не указано как определялись теплофизические свойства теплоносителя и конкретно водо-глицериновой смеси? Какова была доля глицерина в смеси?

11. Обычно величина параметра Рейнольдса $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ меньше единицы. Поэтому широко распространенной является практика использования параметра аналогии Рейнольдса $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)^{1/2}$ или $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)^{1/3}$. Здесь же у авторов почти для всего диапазона числе Рейнольдса потока получается параметра Рейнольдса $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0) > 1$ как для воды, так и для воздуха (см. рис. 4.1а и 4.1б). Правда остается невыясненным вопрос про водо-глицериновую смесь. Авторы об этом вообще не говорят, хотя этот факт очень интересный в плане показывать действенность и работоспособность ИНС.

12. Текст автореферата не полностью соответствует тексту диссертации. В автореферате практически нет результатов оптимизационных расчетов трактов теплообменных аппаратов при наличии макрошероховатости, полученных методом ИНС, и всего лишь

один график. В автореферате п. 6 и 7 положений, выносимых на защиту, речь идет о результатах, полученных с использованием ИНС, но в автореферате их нет.

Высказанные замечания и вопросы не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы Р.А. Шакирова. Автором выполнена большая исследовательская работа; успешно решены поставленные задачи; положения, вносимые на защиту, обоснованы и получены надежные данные, описаны и проанализированы полученные результаты, сделаны научные и практические выводы.

Заключение

Диссертация **Шакирова Руслана Айваровича** на тему «**Оптимальные теплогидравлические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена**», соответствует требованиям п. 5 «Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей», п. 9 «Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты» паспорта специальности 01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

По своему содержанию, актуальности и научной новизне, объему проведенного исследования, теоретической и практической ценности полученных результатов диссертационная работа Шакирова Р.А. соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор **Шакиров Руслан Айварович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Доклад по материалам диссертации Шакирова Р.А. был рассмотрен на онлайн заседании Секции 2 Термогазодинамика и турбулентность 22.06.2022 года, протокол № 4. Присутствовало на заседании 18 чел. Результаты голосования: «за» – 18 чел., «против» – 0 «воздержалось» – 0

Заслуженный деятель науки РФ, Главный научный сотрудник Лаборатории термогазодинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, профессор, д.т.н.
тел.: 8(383) 330-67-36;
e-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Терехов
Виктор
Иванович



Главный научный сотрудник Лаборатории термогазодинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, профессор РАН, д.ф.-м.н.
тел.: 8(383) 316-53-36;
e-mail: pakhomov@ngs.ru

Пахомов
Максим
Александрович



Старший научный сотрудник Лаборатории
термогазодинамики Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО
РАН, к.т.н.
тел.: 8(383) 330-81-28;
e-mail: mtokarev@itp.nsc.ru



Токарев
Михаил
Петрович

Подпись д.т.н., проф., г.н.с. Терехова В.И.; д.ф.-м.н., проф. РАН, г.н.с. Пахомова
М.А. и к.т.н., с.н.с. Токарева М.П. удостоверяю

Ученый секретарь ИТ СО РАН,

к.ф.-м.н.



Макаров М.С.

Сведения об организации:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им.
С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г.
Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1. тел.: 8(383) 330-90-40;
факс: 8(383) 330-84-80;
e-mail: director@itp.nsc.ru