

ОТЗЫВ

официального оппонента 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».

1. Актуальность темы диссертационной работы

Поверхностные интенсификаторы теплообмена, применяемые для повышения теплогидравлической эффективности теплообменных процессов, остаются одним из перспективных способов пассивной интенсификации теплообменного оборудования. Высокая теплогидравлическая эффективность обеспечивается за счет разрушения ламинарного пограничного слоя или вязкостного подслоя турбулентного пограничного слоя, при этом не воздействуя на основной поток. Исследования, направленные на интенсификацию теплообменных процессов, включены в перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники, а также в перечень критических технологий Российской Федерации по направлениям 8 – Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика и 26 – Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии соответственно. В связи с тем, что количество исследований по данной тематике ежегодно продолжает увеличиваться, а результаты исследований не всегда согласуются друг с другом, сохраняется актуальность разработки методов, позволяющие обобщить результаты экспериментальных исследований для различных типов поверхностных интенсификаторов теплообмена, установить обобщающие зависимости между режимными и геометрическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена и работать за пределами режимных и геометрических диапазонов экспериментальных исследований.

В связи с вышеизложенным тема и результаты диссертационной работы Шакирова Руслана Айваровича представляют научный и технический интерес для дальнейших теоретических исследований и внедрения их в эксплуатацию поверхностных теплообменных устройств.

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.

2. Оценка содержания диссертационной работы

Структура диссертации построена по общепринятой схеме и включает введение, четыре главы, выводы, список использованной литературы,

содержащий 170 наименований и 3 приложения. Общий объем работы - 194 страницы машинописного текста, в том числе 164 страницы основного текста, список литературы на 20 и приложений на 10 страницах. Диссертационная работа содержит 85 рисунков и 28 таблиц.

В первой главе выполнен обзор научной литературы по современному состоянию пассивной поверхностной интенсификации теплообмена, теоретических и практических исследований в данной предметной области. В частности, представлен анализ тепловой эффективности, гидравлического сопротивления и теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена сферическими, V-образными, эллиптическими, цилиндрическими и подковообразными выемками, а также полусферическими, кольцевыми и спиральными выступами. Представлен обзор геометрических и режимных характеристик вышеописанных видов поверхностных интенсификаторов теплообмена, оказывающих влияние на энергоэффективность теплообменного оборудования. По результатам анализа научной литературы установлено, что результаты экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена весьма противоречивы, при этом полученные обобщающие зависимости применимы только при тепловых и гидромеханических условиях, в которых были проведены экспериментальные исследования. Это затрудняет проектирование энергоэффективных теплообменных устройств в широком диапазоне эксплуатационных условий теплотехнологического цикла производства.

Таким образом, на основе анализа литературных научных источников сформулированы цели и основные задачи исследований.

Во второй главе представлено описание разработанных методик и алгоритмов, реализующее предложенный автором метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с поверхностными интенсификаторами различной формы. Метод включает в себя методику обобщения экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена, методику формирования базы данных экспериментальных исследований интенсификации поверхностных теплообменных устройств, методику нормализации параметров базы данных экспериментальных исследований и устранения аномалий, связанных с погрешностью измерения или интерпретации экспериментальных данных, методику нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации теплообмена.

Подробно описан предмет исследования - теплообменное оборудование с трубчатыми и пластинчатыми теплообменными поверхностями с пассивными интенсификаторами теплообмена различной формы.

Представлена разработка нейросетевой модели оптимальных характеристик поверхностных интенсификаторов, а также исходная структура искусственной нейронной сети, результаты оценки точности и методики ее оптимизации. На основе разработанной базы данных экспериментальных

исследований произведено нейросетевое моделирование поверхностной интенсификации теплообмена. По результатам нейросетевого моделирования установлены характерные взаимосвязи между режимными и геометрическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена, позволяющие работать за пределами тепловых и гидромеханических условий экспериментальных исследований. Представлена разработка инструментального программного обеспечения, реализующее предложенный метод.

В третьей главе представлены полученные результаты исследования, анализ согласования с экспериментальными исследованиями, а также описание разработанного прикладного программного обеспечения, реализующего предложенный метод исследования. Представлены результаты нейросетевого моделирования эффективности теплообмена при поверхностной интенсификации, оптимизации поверхностной интенсификации теплообмена, а также режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Установлены 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 исследования предложенным методом вполне удовлетворительно согласуются с результатами экспериментальных исследований.

Разработанный комплекс прикладных программ предназначен для нейросетевого моделирования параметров режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена и позволяет получить оптимальные характеристики по заданным пользователем параметрам, а также спрогнозировать значения тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности при поверхностной интенсификации теплообмена и может использоваться при проектировании новых и повышении энергетической эффективности эксплуатируемых теплообменных устройств. Функциональные возможности комплекса прикладных программ позволяют получить прогнозные значения оптимальных характеристик для следующих типов поверхностных интенсификаторов теплообмена: кольцевые и полусферические выступы, сферические, капельные, *V*-образные, эллиптические, подковообразные, цилиндрические выемки и спиральные проволочные вставки.

Четвертая глава посвящена исследованию энергоэффективности трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с пассивными интенсификаторами различной формы. Для оценки эффективности теплообменной поверхности используется фактор аналогии Рейнольдса – соотношение увеличения теплоотдачи к увеличению гидравлических потерь. Установлено, что максимальная теплогидравлическая эффективность достигается при пассивной интенсификации трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей кольцевыми и полусферическими выступами, а также спиральными проволочными вставками. Получены оптимальные

геометрические и режимные характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена, позволяющие проектировать энергоэффективные теплообменные устройства.

По результатам исследования разработан способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования. Этот способ позволяет поддерживать энергоэффективность теплообменных устройств при изменении внешних условий, свойств теплоносителей и режимов работы технологического оборудования. Предложенный способ интенсификации теплообмена оперирует только с режимными характеристиками теплообменного оборудования, обеспечивая энергоэффективный теплообмен с минимальными затратами на реализацию способа, т.к. не требуется замена теплообменной поверхности или изменение геометрических характеристик теплообменного оборудования. Представлена практическая реализация способа на примере интенсификации устройства для охлаждения природного газа (УОГ). Сравнение годовой потребляемой мощности УОГ показывает, что реализация предложенного способа позволяет сократить потребление электроэнергии до 77 % в зависимости от режима работы компрессорной станции и температуры окружающей среды.

3. Оценка научной новизны полученных результатов

Основная научная новизна диссертационного исследования и полученных результатов заключается в том, что обобщение результатов экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена путем установления характерных взаимосвязей между режимными и геометрическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена в среде искусственных нейронных сетей позволяет разработать способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования, а также метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств с пассивными интенсификаторами различной формы. Предложенный метод исследования позволяет установить общие закономерности влияния геометрических и режимных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена на тепловую, гидравлическую и теплогидравлическую эффективность при конвективном теплообмене, установить оптимальные характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена за пределами диапазонов экспериментальных исследований, что до этого не было реализовано в данной предметной области.

4. Практическая значимость работы

По результатам исследования установлены оптимальные геометрические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде сферических, V-образных, эллиптических, цилиндрических и подковообразных выемок, а также полусферических,

кольцевых и спиральных выступов, обеспечивающие теплогидравлическую эффективность поверхностных теплообменных устройств.

Разработанный автором метод исследования однофазной вынужденной конвекции позволяет обобщить результаты экспериментальных исследований и установить оптимальные режимные и геометрические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена, обеспечивающие максимальную тепловую, гидравлическую и теплогидравлическую эффективность как в диапазоне экспериментальных исследований, так и за пределами имеющихся опытных данных. Кроме того, установленные взаимосвязи между режимными и геометрическими характеристиками позволяют определить оптимальные значения режимных и геометрических характеристик по отдельности и значения тепловой эффективности, гидравлического сопротивления и теплогидравлической эффективности по заданному набору геометрических и режимных характеристик. Таким образом, метод исследования позволяет проектировать энергоэффективные теплообменные поверхности, а также может быть использован в качестве системы поддержки принятия решений при проектировании теплообменного оборудования.

Разработанный автором способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками позволяет повысить энергетическую эффективность эксплуатируемого теплообменного оборудования. Эффективность предложенного способа подтверждена практической реализацией при интенсификации устройства охлаждения природного газа на выходе компрессорной станции.

Необходимо отметить, что обобщающие характеристики получены по результатам экспериментальных исследований, а также произведено устранение аномалий, связанных с погрешностью измерения или интерпретации экспериментальных данных. Это позволяет минимизировать неопределенность при нейросетевом моделировании поверхностной интенсификации теплообмена.

Для практической реализации предложенного способа и метода исследования разработан комплекс прикладного программного обеспечения, включающий в себя нейросетевое моделирование тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности, режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена, а также оптимизации поверхностной интенсификации теплообмена в среде искусственных нейронных сетей (Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022615393, №2022615175, №2022615056).

5. Обоснованность и достоверность полученных результатов

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 положительно согласовываются с результатами исследований в

экспериментальных диапазонах режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Это позволяет сделать вывод о том, что результаты нейросетевого моделирования для геометрических и режимных характеристик вне диапазона проведенных экспериментальных исследований с достаточно высокой точностью характеризуют эффективность пассивной поверхностной интенсификации теплообмена.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается верификацией полученных данных с результатами экспериментальных исследований при одинаковых тепловых и гидромеханических условиях поверхностной интенсификации теплообмена, а также использованием апробированных методов математического моделирования, сравнением результатов нейросетевого моделирования с фактическими значениями экспериментальных исследований.

6. Апробация работы

По теме исследования опубликовано 13 печатных работ, 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. Апробация работы проведена на 13 международных и всероссийских конференциях.

7. 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: пункту 5: «Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей»; пункту 9: «Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты».

8. Вопросы и замечания по диссертации

1. По тексту диссертации есть упоминание о точности и погрешности нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации теплообмена, но нет конкретных количественных данных для нейросетевого моделирования тепловой эффективности, гидравлического сопротивления и теплогидравлической эффективности для каждого типа поверхностного интенсификатора теплообмена. Кроме того, в соответствии с ГОСТ 34100.1-2017 рекомендуется использовать термин неопределенность.

2. Из диссертации не понятно: исследовалось ли автором влияние загрязнения теплообменной поверхности при практической реализации

разработанного способа интенсификации теплообмена на устройстве охлаждения природного газа?

3. Обзорная глава имеет слишком большой объем, который мог быть сокращен за счет вопросов, не относящихся напрямую к пассивной поверхностной интенсификации теплообмена.

4. В таблицах 4.1 и 4.2 приведены оптимальные относительные геометрические параметры поверхностных интенсификаторов теплообмена для трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств. Какие критерии использовались при выборе типа интенсификатора для трубчатых теплообменных устройств, а какие для пластинчатых?

5. В таблице 3.4 при сравнении значений нейросетевого моделирования геометрических и режимных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена с экспериментальными данными в качестве режимного параметра для всех типов поверхностных интенсификаторов используется число Рейнольдса, кроме подковообразных выемок, где использована среднерасходная скорость потока. Чем обоснован выбор данного параметра для поверхностных интенсификаторов в виде подковообразных выемок?

6. Результаты исследования в автореферате и диссертационной работе представлены в основном в табличном виде. Было бы целесообразно в автореферате представить больше графического материала.

9. Заключение

В целом, диссертационная работа Шакирова Руслана Айваровича представляет собой законченное научное исследование, выполненное автором самостоятельно и на высоком уровне. В диссертации разработан метод исследования однофазной вынужденной конвекции, позволяющий установить оптимальные теплогидравлические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена, а также способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования. Предложенные автором метод исследования и способ интенсификации вносят значительный вклад в создание энергоэффективных теплообменных устройств и обеспечение теплогидравлической эффективности эксплуатируемого теплообменного оборудования.

В диссертационной работе содержится решение задачи повышения энергоэффективности поверхностных теплообменных устройств с пассивными интенсификаторами теплообмена различной формы, установления обобщающих характеристик поверхностной интенсификации теплообмена, разработка метода исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов, который позволяет работать за пределами диапазонов экспериментальных исследований, что имеет важное фундаментальное и прикладное значение для развития науки об интенсификации конвективного теплообмена.

Считаю, что диссертационная работа «Оптимальные теплогидравлические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена» соответствует требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор, Шакиров Руслан Айварович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ», доктор технических наук, профессор



Щукин
Андрей Викторович

«16» августа 2022 г.

Сведения об организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ), 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, д. 10.

тел.: +7 (843) 238-41-10

e-mail: a.v.shchukin@rambler.ru



Подпись Щукина АВ
заверяю. Начальник управления
делопроизводства и контроля
17.08.2022