

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.082.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 15 сентября 2022 г., № 26/2022

О присуждении Шакирову Руслану Айваровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Оптимальные теплогидравлические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена» по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, принята к защите 16 июня 2022 г. (протокол заседания № 25/2022) диссертационным советом Д 212.082.02, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, приказ №105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель **Шакиров Руслан Айварович**, 13 апреля 1992 года рождения, в 2015 году окончил очный специалитет государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Альметьевский государственный нефтяной институт» по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств»,

в 2022 г. окончил заочную аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» по направлению подготовки

03.06.01 Физика и астрономия, направленность «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и сдал необходимые кандидатские экзамены.

В настоящее время Шакиров Руслан Айварович по основному месту работы занимает должность инженера второй категории отдела сопровождения инновационной деятельности ООО «Газпром трансгаз Чайковский».

Диссертация выполнена на кафедре «Автоматизация технологических процессов и производств» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Научный руководитель – **Гильфанов Камиль Хабибович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Официальные оппоненты:

1. **Щукин Андрей Викторович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»;

2. **Ковальногов Владислав Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тепловая и топливная энергетика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет»;

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, город Новосибирск, в своем **положительном** заключении, подписанным заслуженным деятелем науки РФ,

главным научным сотрудником лаборатории термогазодинамики, доктором технических наук, профессором Тереховым Виктором Ивановичем, главным научным сотрудником лаборатории термогазодинамики, доктором физико-математических наук, профессором РАН Пахомовым Максимом Александровичем, старшим научным сотрудником лаборатории термогазодинамики, кандидатом технических наук Токаревым Михаилом Петровичем и утвержденным исполняющим обязанности директора Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, академиком РАН Марковичем Дмитрием Марковичем указала, что 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 Руслана Айваровича 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».

По теме диссертационного исследования Шакиров Руслан Айварович имеет 12 опубликованных научных работ, 2 из которых в журналах, включенных в перечень ВАК, 2 в сборниках, индексируемых в международных базах WoS и

Scopus. В Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент) зарегистрированы 3 программы для ЭВМ.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

Публикации в изданиях, входящих в Перечень ВАК

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 /Известия высших учебных заведений «Авиационная техника», Казань: КНИТУ им. А.Н. Туполева, 2021, № 1. - С. 57-65.

Публикации в изданиях, индексируемых в WoS и Scopus

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., pp. 124.
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.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

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

2. Шакиров Р.А., Гильфанов К.Х., Свидетельство о государственной регистрации №2022615175 Нейросетевое моделирование режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Дата 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 регистрации 29.03.2022 г.

На диссертацию и автореферат поступило 6 отзывов. Из них положительных – 6. С замечаниями – 4. Отзывы поступили от:

1. Доктора технических наук, профессора кафедры «Автоматики и управления», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ), заслуженного деятеля науки РФ, Лауреата премии Правительства РФ, действительного члена Академии наук Татарстана, заслуженного профессора КНИТУ-КАИ, Дегтярева Геннадия Лукича.

Замечания: Способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками поверхностного теплообменного оборудования представлен недостаточно полно. В автореферате не представлены критерии оптимальности и не раскрыт смысл интеллектуального управления.

2. Доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой «Физики и химии», государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Альметьевский государственный нефтяной институт» Двояшкина Наримана Камиловича.

Замечания: Автору следовало бы более детально привести обоснование необходимости разработки собственного инструментального программного обеспечения нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации теплообмена и отметить его принципиальное отличие от других программ

(Matlab, Neurosolutions), позволяющих создать нейросетевую модель физического процесса.

3. Доктора технических наук, профессора кафедры «Информационные процессы и управления» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» Дмитриевского Бориса Сергеевича.

Замечания:

1. Небольшое количество иллюстрирующего материала в автореферате, что мешает пониманию сути работы.

2. При описании содержания второй главы диссертации в автореферате используется термин погрешность. В соответствии с ГОСТ Р 54500.3-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 рекомендуется использовать термин «неопределенность».

4. Доктора технических наук, доцента, ведущего научного сотрудника всероссийского научно-исследовательского института расходомерии - филиала Федерального государственного унитарного предприятия "Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева" государственного научного метрологического центра, Щелчкова Алексея Валентиновича.

Замечания: Замечаний нет.

5. Кандидата технических наук, доцента кафедры «Теплотехника и теплоэнергетика», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» Ротинян Елены Михайловны.

Замечания:

1. Поскольку первая глава посвящена обзору и систематизации литературных данных по пассивной интенсификации теплообмена с интенсификаторами в виде выемок и выступов различной геометрии, в тексте встречаются различные обозначения, введенные авторами рассматриваемых

работ, не все из которых объяснены в тексте диссертации. Например, на рис. 1.8 приводятся зависимости $St/St_{гл}$ от геометрических параметров системы сферических выемок, при этом число Стантона вводится значительно позже формулой (1.4); в табл. 1.2. приведена взятая из [19] зависимость $Nu(Re)$ с коэффициентом пропорциональности k , без пояснений, что за коэффициент; не понятно, что такое H^+ и h^+ на рис. 1.22 и 1.23; чем отличается d и d_i и что такое p в (1.1); что такое показатель давления на рисунке 1.31?

2. Имеются, в небольшом количестве, опечатки. Например, в табл.1.3 ошибочно указана граница переходного режима; на стр.32 сомнения вызывают формулы $Nu=(d/D)^{-1,93}$ и $\xi=(d/D)^{-1,45}$; на рис.1.18 б стрелки на графиках, судя по размерности, указывают области определённых значений коэффициента теплоотдачи α , а не h .

3. В главе 1 рассматривается, кроме прочего, влияние на теплоотдачу различных типов выемок в расширяющихся и сужающихся каналах (рис. 1.17, по данным работы [77]), т.е. в градиентных течениях. Не совсем понятно, почему в перечне режимных и геометрических параметров при разработке метода исследования не фигурирует степень расширения/сужения канала или градиент давления. Если каналы с переменной геометрией не рассматривались, зачем приведены данные [77]?

4. Подробно описаны пассивные интенсификаторы в виде сферических, V-образных, эллиптических, цилиндрических и подковообразных выемок, а также полусферических, кольцевых и спиральных выступов. Однако, начиная со стр.60 (табл. 2.9) появляются капельные углубления, без объяснения, чем они отличаются от полусферических или эллиптических.

6. Кандидата технических наук, доцента, заведующего кафедрой «Теплоэнергетика и холодильные машины», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Астраханский государственный технический университет» Ильина Романа Альбертовича

Замечания: Замечаний нет.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывался их известностью и достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследований и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработан новый метод исследования однофазной вынужденной конвекции при поверхностной интенсификации теплообмена, который позволяет обобщить результаты экспериментальных исследований с целью установления наилучших характеристик пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена, обеспечивающие теплогидравлическую эффективность в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств. Особенностью данного метода является отказ от фундаментальных уравнения сохранения, которые в настоящее время не позволяют представить универсальную модель взаимосвязей между характеристиками пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена.

Разработан новый способ идентификации тепловых и гидромеханических условий при поверхностной интенсификации теплообмена, представляющий собой программное средство, использующее экспертные знания для энергоэффективного обтекания поверхностей и теплообмена. В отличие от существующих способов управления интенсификацией, в предложенном способе экспертные знания формируются в процессе нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации теплообмена. Особенностью данного способа является интеллектуальное управление режимными характеристиками теплообменных устройств, а также применение предиктивного и прескриптивного анализа работы теплообменного оборудования.

Предложен новый метод обобщения результатов экспериментальных исследований пассивной поверхностной интенсификации теплообмена на основе анализа характерных взаимозависимостей между тепловыми и

гидромеханическими характеристиками теплообменного оборудования. В отличие от традиционных методик, которые не позволяют получить единые обобщенные взаимозависимости, поскольку эмпирические математические модели разных исследователей справедливы только в диапазонах проведенных опытов при определенных граничных условиях, предложенный метод позволяет установить взаимозависимости по результатам обобщения экспериментальных исследований в широком диапазоне тепловых и гидромеханических факторов.

Установлены оптимальные параметры относительных геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена по тепловой, гидравлической и теплогидравлической эффективности для трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена.

Доказана перспективность использования предложенного метода исследования однофазной вынужденной конвекции для проектирования и эксплуатации энергоэффективных трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств.

Теоретическая значимость проведенных исследований состоит в следующем:

Доказана эффективность разработанного метода исследования однофазной вынужденной конвекции, позволяющий расширить представление о пассивной поверхностной интенсификации теплообмена в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик теплообменных поверхностей с завихрителями потока различной формы.

Доказана применимость предложенного способа идентификации тепловых и гидромеханических условий при поверхностной интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств, что вносит вклад в расширение границ практической реализации результатов исследований пассивной поверхностной интенсификации теплообмена и

представлений об использовании нейросетевых технологий в практике управления интенсификацией теплообмена.

Применительно к проблематике диссертации результативно использованы (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) методы и технологии анализа больших объемов данных, формирования логических взаимосвязей и выявление из них скрытых закономерностей, методы системного анализа, математического и компьютерного моделирования, методы оптимизации – стохастический градиентный спуск, бутстрэпирования, ROC-анализа, объектно-ориентированного программирования.

Изложены этапы разработки предложенного метода и полученные в результате ее применения результаты исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей с интенсификаторами в виде выемок и выступов различной формы.

Раскрыты проблемы и недостатки существующих подходов к обобщению и практическому применению результатов экспериментальных исследований поверхностной интенсификации теплообмена, заключающиеся в справедливости результатов только в диапазоне тепловых и гидромеханических условий экспериментальных исследований.

Выявлены алгоритмические обобщающие взаимозависимости между режимными и геометрическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде выемок и выступов различной геометрии, позволяющие описать процессы интенсификации теплообмена и установить параметры режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена, обеспечивающие теплогидравлическую эффективность.

Изучено влияние геометрических и режимных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена на тепловую эффективность, гидравлическое сопротивление и теплогидравлическую эффективность при

пассивной интенсификации поверхностных теплообменных устройств кольцевыми, полусферическими выступами и спиральными проволочными вставками.

Установлено, что при низких числах Рейнольдса Re_D кольцевые выступы и спиральные проволочные вставки приводят к увеличению теплоотдачи Nu/Nu_0 при опережающем росте гидравлического сопротивления ξ/ξ_0 . В области переходных чисел Рейнольдса Re_D выявлена значительная зависимость теплогидравлической эффективности $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ поверхностной интенсификации от высоты выступов h . Полусферические выступы позволяют значительно уменьшить критическое число Рейнольдса $Re_{кр}$. Повышение высоты кольцевых выступов и спиральных проволочных вставок h до 0,00033 м. приводит к достижению положительно эффекта интенсификации. Увеличение относительного шага t/D приводит к падению гидравлического сопротивления.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

Разработан и внедрен новый способ идентификации тепловых и гидромеханических условий при поверхностной интенсификации теплообмена, позволяющий обеспечивать энергоэффективность трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств за счет интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования. Реализация данного способа в качестве прескриптивной системы управления режимными характеристиками устройства охлаждения природного газа на выходе компрессорной станции «Ординская» позволило сократить годовое потребление электроэнергии до 8-10%.

Разработанный комплекс прикладных программ и инструментальное программное обеспечение **внедрены** в учебный процесс на кафедре автоматизации технологических процессов и производств ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Разработан новый метод исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и

геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. Реализация метода, в частности тестирование нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена показало способность прогнозировать теплофизические характеристики интенсификаторов теплообмена, с погрешностью от 1,6 до 3% в зависимости от типа интенсификаторов теплообмена.

Разработана интеллектуальная компьютерная модель по характеристикам пассивных поверхностных интенсификаторов теплообмена различной формы, представляющая собой комплекс прикладных программ для расчета наиболее выгодных теплогидравлических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена. В отличие от существующих подходов, где определение оптимальных характеристик интенсифицированных поверхностей, предполагает разработку обобщенной математической модели в виде функционалов оптимизации от факторов влияния, разработанная компьютерная модель позволяет по заданным тепловым и гидромеханическим параметрам теплообменного оборудования установить наиболее выгодные геометрические и режимные характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена, обеспечивающие энергоэффективность теплообменных устройств.

Определены направления практического использования разработанного метода исследования однофазной вынужденной конвекции для проектирования энергоэффективного теплообменного оборудования с трубчатыми и пластинчатыми теплообменными поверхностями и способа идентификации тепловых и гидромеханических условий при поверхностной интенсификации теплообмена для обеспечения теплогидравлической эффективности эксплуатируемых поверхностных теплообменных устройств.

Создано инструментальное программное обеспечение, позволяющее разрабатывать прикладное программное обеспечение, направленное на расчет тепловых и гидромеханических процессов при пассивной поверхностной интенсификации теплообмена путем учета взаимосвязей между режимными и

геометрическими характеристиками поверхностных интенсификаторов теплообмена.

Предложен новый метод математического моделирования характеристик поверхностной интенсификации теплообмена, тепловой эффективности, гидравлического сопротивления, теплогидравлической эффективности трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств, геометрических и режимных характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена.

Представлены параметры геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена в виде сферических, V-образных, эллиптических, цилиндрических и подковообразных выемок, а также полусферических, кольцевых и спиральных выступов, обеспечивающие теплогидравлическую эффективность трубчатых и пластинчатых теплообменных устройств.

Оценка достоверности результатов исследований выявила:

Результаты нейросетевого моделирования поверхностной интенсификации теплообмена **получены** посредством использования апробированных методов интеллектуального компьютерного и математического моделирования.

Для подтверждения полученных данных предложенным методом исследования однофазной вынужденной конвекции **проведено** предварительное преобразование исходных данных методом бутстрэпирования с последующей верификацией полученных данных с экспериментальными значениями. Сравнение полученных результатов с результатами экспериментальных исследований показало положительное согласование с погрешностью 3%. Также был **выполнен** ROC-анализ, заключающийся в поиске точки отсечения непрерывных и дискретно - количественных характеристик нейросетевой модели поверхностной интенсификации теплообмена, обеспечивающих теплогидравлическую эффективность.

Теория построена на известных положениях математического и нейросетевого моделирования и согласуется с опубликованными результатами других авторов по теме диссертации и по смежным отраслям.

Установлено соответствие полученных результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике. Результаты экспериментальных работ соответствуют результатам исследования однофазной вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических характеристик поверхностных интенсификаторов теплообмена.

Достоверность полученных результатов исследования **подтверждается** тестированием и положительным согласованием полученных результатов исследования однофазной вынужденной конвекции в среде искусственных нейронных сетей с результатами экспериментальных исследований различных авторов.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии во всех этапах получения результатов, приведенных в диссертации, включая формирования цели и задачи исследования, построения базы данных по результатам экспериментальных исследований, разработке алгоритма и инструментального программного обеспечения, а также комплекса прикладных программ, нейросетевом моделировании поверхностной интенсификации теплообмена, обработке и анализе полученных результатов, анализе согласования полученных результатов с результатами экспериментальных исследований, подготовке публикаций по тематике научного исследования и трёх свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Диссертационный совет рекомендует использовать результаты диссертационного исследования Шакирова Руслана Айваровича в научно-исследовательских учреждениях и лабораториях, занимающихся проектированием, исследованием, разработкой и интенсификацией процессов теплообмена на существующих производствах, в научно-образовательном процессе в профильных ВУЗах, а также на предприятиях, имеющих теплообменное оборудование.

Диссертация Шакирова Руслана Айваровича «Оптимальные теплогидравлические характеристики поверхностных интенсификаторов

