МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
**«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»
(ИГЭУ)**

Рабфаковская ул., д. 34, г. Иваново, 153003
тел.(4932) 269-999, факс (4932) 385-701
e-mail: office@ispu.ru http://игэу.рф http://ispu.ru
ОКПО 02068195; ОГРН 1033700074430
ИНН/КПП 3731000308/370201001

29.10.2026 № 01-03-21

На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «ИГЭУ»,
кандидат технических наук, доцент
Сулыненков Илья Николаевич

«29» октября 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» на диссертацию **Ахмитшина Алмаза Анасовича** на тему **«Теплогидравлические характеристики пленочной конденсации пара и интенсификации теплообмена в аппаратах при нагреве сред с повышенной вязкостью»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника»

Актуальность темы диссертационной работы

Актуальность исследования обусловлена широким применением в промышленной нефтехимии, нефтегазопереработке, а также на тепловых электрических станциях (ТЭС) процессов нагрева и охлаждения жидких углеводородных смесей, обладающих повышенной вязкостью и большими числами Прандтля (мазуты, минеральные и синтетические масла, тяжелые нефтяные остатки). Из-за высокой вязкости движение таких сред в каналах теплообменного оборудования происходит при ламинарном режиме, характеризующемся низкими коэффициентами теплоотдачи и коэффициентами эффективности теплообмена.

В связи с этим важной и актуальной задачей теории и практики теплотехники является разработка компактных, высокоэффективных теплообменных аппаратов с пассивными интенсификаторами (поверхностными и объемными насадками), которые обеспечивают турбулизацию вязких сред при небольших числах Рейнольдса.

Таким образом, диссертация Ахмитшина А.А., направленная на физическое и математическое моделирование, экспериментальное изучение, а также создание надежных инженерных методик предпроектного расчета интенсифицированных пластинчатых теплообменных аппаратов для высоковязких технологических сред, является актуальной.

Целью диссертационной работы является физическое и математическое моделирование интенсифицированного теплообмена через разделяющую стенку в пластинчатых теплообменниках с мелкими хаотичными насадками и обобщение результатов в виде расчетных выражений по тепловой эффективности процесса и гидравлическому сопротивлению.

Общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 118 наименований и приложений. Текст работы изложен на 167 страницах машинописного текста, содержит 66 рисунков и 16 таблиц.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследований, степень достоверности результатов диссертации, приведены положения, выносимые на защиту, информация о реализации и апробации результатов работы, количестве публикаций автора по теме диссертации, личном вкладе автора и структуре работы.

В первой главе представлен подробный аналитический обзор современных методов и технических решений в области пассивной интенсификации конвективного теплообмена. Рассмотрены поверхностные интенсификаторы (дискретно-шероховатые каналы, накатки, выступы, лунки, проволочные вставки) и объемные заполнители (пористые материалы, шаровые укладки, зернистые слои, мелкие хаотичные металлические насадки). Автор детально классифицирует механизмы пассивной интенсификации, подчеркивая их влияние на разрушение пристенного ламинарного пограничного слоя. На основе анализа широкого перечня отечественной и зарубежной литературы показано, что большинство существующих исследований относится к турбулентным режимам, в то время как ламинарный и переходный режимы течения высоковязких сред изучены в значительно меньшей степени. Анализируя результаты

литературного обзора, соискатель убедительно доказывает необходимость продолжения исследований и математического моделирования процессов в каналах с мелкими хаотичными элементами, после чего формулирует цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе приведено описание разработанной автором оригинальной конструкции промышленного теплообменного аппарата радиально-спирального типа, выполненного из герметичных неразборных блоков в форме прямых призм на основе металлических профилированных листов. Данное техническое решение направлено на максимизацию удельной площади поверхности в единице полезного объема и существенное упрощение монтажа оборудования. Далее излагаются результаты экспериментальных исследований процесса пленочной конденсации водяного пара (на примере воды) и паров органических веществ (на примере третбутилового спирта) на двух специально сконструированных лабораторных стендах, оснащенных трубчатыми электронагревателями мощностью 10 кВт. По результатам четырех серий экспериментов автором построены графические зависимости, наглядно демонстрирующие влияние расхода и входной температуры хладагента на количество образующегося конденсата, а также выявлен эффект стабилизации процесса, когда при высоких скоростях хладагента определяющим становится термическое сопротивление самой пластины. В завершение главы на основе полученных закономерностей предложена инженерная методика расчета пластинчатых теплообменников для процесса пленочной конденсации.

В третьей главе представлена разработанная сопряженная математическая модель процесса пленочной конденсации в двухмерной постановке, базирующаяся на уравнениях сохранения импульса, массы и энергии для хладагента, стекающей под действием гравитационных и межфазных сил пленки конденсата и паровой фазы. В уравнениях движения корректно учтена температурная зависимость динамической вязкости рабочих сред посредством полиномиальных аппроксимаций. На границах раздела фаз «стенка-хладагент», «стенка-пленка» и «пленка-пар» записаны граничные условия сопряжения с учетом изменения теплофизических свойств и сил поверхностного натяжения. Представлен численный алгоритм решения полученной нелинейной системы дифференциальных уравнений, основанный на сведении двумерной задачи к двум одномерным и интегрирования методом Рунге-Кутта (Гира) четвертого порядка с проверкой устойчивости и сходимости. Проведенный автором вычислительный эксперимент позволил рассчитать локальные профили температур, давлений и толщины стекающей пленки по высоте канала для оценки интенсивности теплоотдачи.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментального исследования интенсификации теплопередачи при ламинарном движении минерального гидравлического масла марки Роснефть HLP 46, нагреваемого водяным паром в гладком канале пластинчатого теплообменника и в канале, заполненном мелкой хаотичной металлической насадкой типа «Инжехим-2012». Автором экспериментально установлено, что наличие насадки при малых числах Рейнольдса (Re=5…20) повышает интенсивность теплообмена в 1,5–2 раза, а при (Re=40…400) за счет раннего перехода к турбулизации потока коэффициент теплоотдачи возрастает в 6–12 раз. На основе теории диссипации механической энергии в объеме и в пограничном слое получены новые полуэмпирические выражения для расчета чисел Нуссельта и аппроксимирован коэффициент гидравлического сопротивления насадочного слоя. Для практического проектирования разработана математическая модель на основе теплового числа единиц переноса и ячеечной гидродинамической структуры потоков, которая позволяет с достаточной точностью рассчитать тепловую эффективность (КПД) аппарата и конечные температуры вязких сред с учетом фактора обратного перемешивания потока. Приведены сравнительные графики эффективности различных типов интенсификаторов и примеры выполнения предпроектных и поверочных инженерных расчетов.

В заключении диссертационной работы сформулированы научные и практические выводы, которые полностью отражают решение всех поставленных во введении задач. Автор обобщает результаты построения двухмерной математической модели пленочной конденсации и подтверждает ее адекватность собственными экспериментами с точностью до 10–12 %. Четко зафиксированы количественные пороги эффективности хаотичной насадки по числам Нуссельта и Нуссельта-Прандтля для высоковязких масел при переходе ламинарного режима в турбулентный.

В выводах приводится обоснование преимуществ использования ячеечной модели структуры потоков, исключающей завышение эффективности (на 5–15 %), свойственное упрощенной модели идеального вытеснения. Также отражены реальные результаты промышленного внедрения разработанных научно-технических решений, включая успешный опыт эксплуатации малогабаритного холодильника-дефлегматора на ректификационной установке разделения тяжелого газойля, а также использование методик в ООО «ИВЦ «Инжехим» и ООО «Теплобокс-ПКО», что подчеркивает завершенность и высокую прикладную ценность диссертационного исследования.

Преимуществом работы является сочетание экспериментальных и расчётно-теоретических методов, позволивших получить аналитические зависимости для оценки эффективности процессов тепломассообмена и разработать алгоритмы инженерных расчётов.

Результаты исследования имеют как теоретический, так и прикладной характер и могут быть использованы при проектировании и модернизации теплообменных аппаратов. Основные положения диссертации отражены в опубликованных работах и представлены на научно-технических конференциях. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и достоверно отражает её новизну и практическую значимость.

Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность научных результатов, полученных соискателем, базируется на применении фундаментальных законов тепломассообмена – законах сохранения импульса, массы и энергии, корректном использовании математических методов численного решения дифференциальных уравнений и современных моделей теории пограничного слоя. Экспериментальные исследования выполнены на сертифицированных стендах с использованием аттестованной контрольно-измерительной аппаратуры (термопреобразователей сопротивления ДТС044, датчиков давления ПД100, шестеренчатых счетчиков OGM-15M).

Достоверность подтверждается удовлетворительным качественным и количественным сопоставлением результатов вычислительных экспериментов с собственными экспериментальными данными автора (расхождение не превышает 10–12 %), а также с классическими теоретическими решениями Нуссельта и результатами независимых отечественных и зарубежных исследователей.

Основные положения диссертации достаточно полно отражены в 21 печатной работе, включая 7 статей в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ, публикации в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, а также патент РФ на изобретение № 2583316. На научные разработки имеются официальные акты и справки о внедрении в промышленность и учебный процесс.

Значимость результатов работы для развития соответствующей отрасли науки, научная новизна

Диссертационная работа вносит существенный вклад в развитие теории теплопередачи и интенсификации теплообменных процессов в вязких средах. К наиболее значимым элементам научной новизны относятся:

1. Двухмерная сопряженная математическая модель пленочной конденсации пара, совместно описывающая гидродинамику и теплообмен хладагента в замкнутом ка-

нале, стекающей под действием гравитационных и межфазных сил пленки конденсата и парового потока с учетом нелинейного изменения вязкости сред от температуры.

2. Экспериментально установленные закономерности теплогидравлики ламинарного течения высоковязкого гидравлического масла в пластинчатом канале с мелкой хаотичной металлической насадкой, фиксирующие увеличение коэффициентов теплоотдачи в 1,5–2 раза при малых числах Рейнольдса (Re=5...20) и в 6–12 раз в интервале (Re=40…400) при переходе к искусственной турбулизации потока.

3. Обобщенные критериальные уравнения для расчета чисел Нуссельта при течении вязких жидкостей в каналах с хаотичной насадкой, полученные с использованием теории диссипации механической энергии в объеме и в пограничном слое.

4. Модифицированный метод расчета тепловой эффективности (КПД) пластинчатых и трубчатых теплообменников с объемными заполнителями на основе применения ячеечной модели структуры потоков, позволяющий количественно учесть негативное влияние обратного перемешивания вязкой среды на средний температурный напор и тепловую эффективность.

Практическая значимость работы заключается в разработке новых высокоэффективных конструкций и надежного инженерного программно-методического обеспечения для их проектирования. Сконструированные автором теплообменные блоки в форме прямых призм из профилированных металлических листов обеспечивают существенное упрощение сборки и максимизацию удельной площади поверхности в единице объема аппарата.

Результаты работы успешно внедрены в инженерную практику ООО «ИВЦ «Инжехим» (г. Казань) при проектировании дефлегматоров и теплообменников установок ректификации и синтеза полимеров (включая проекты для ООО «СИБУР Инновации» и зарубежные нефтеперерабатывающие объекты), а также использованы при импортозамещении узлов промышленных теплогенераторов в ООО «Теплобокс-ПКО». Разработанные стенды и программные алгоритмы внедрены в научный и производственный процесс.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника» в части направлений исследований – пункту 1: «Теоретическое и экспериментальное исследование фундаментальных закономерностей процессов теплопроводности, конвективного теплообмена, радиационного теплообмена, а также процессов массообмена в однофазных и многофазных средах при наличии или отсутствии химических превращений»; пункту 5: «Научные основы и

методы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты. Процессы тепло- и массообмена в оборудовании, предназначенном для производства, преобразования, передачи и потребления теплоты»; и пункту 6: «Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту в системах и установках».

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при проектировании и эксплуатации оборудования для охлаждения или нагрева жидких сред с повышенной вязкостью на предприятиях нефтехимического и топливно-энергетических комплексов. В частности, научно-технические решения автора могут найти практическое применение в проектно-конструкторской деятельности ОАО «ВНИИНЕФТЕМАШ», АО «НИИхиммаш», а также на нефтеперерабатывающих и химических предприятиях ПАО «СИБУР», ПАО «Роснефть», ПАО «ГАЗПРОМ», ООО «ЗапСибНефтехим» и ООО «КИНЕФ». Сформированные алгоритмы предпроектного расчета теплообменников с объемными интенсификаторами целесообразно использовать для повышения энергоэффективности мазутных и маслосистем на тепловых электрических станциях. Кроме того, материалы исследования могут быть применены в учебном процессе вузов при подготовке инженеров-теплотехников и специалистов по промышленной теплоэнергетике.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. В уравнениях сопряженной математической модели пленочной конденсации (глава 3) температурная зависимость теплофизических свойств учтена преимущественно для динамического коэффициента вязкости сред. Автору следовало бы пояснить, как сказывается пренебрежение температурной зависимостью плотности и коэффициента теплопроводности на погрешность расчета локальных чисел Нуссельта при больших температурных напорах.

2. Из текста диссертации недостаточно ясно, проводилась ли оценка влияния пристенного эффекта (изменения порозности слоя насадки непосредственно у плоской стенки пластинчатого канала) на структуру распределения скоростей вязкой жидкости и локальную теплоотдачу.

3. В четвертой главе приведено детальное сравнение теплогидравлической эффективности хаотичных насадок с поверхностными интенсификаторами (кольцевыми выступами и проволочными вставками). Представляет интерес сопоставление полученных результатов с эффективностью широко распространенных промышленных пластинчатых теплообменников с сетчато-поточными гофрированными пластинами (типа «елка»).

4. В цели диссертации указано об исследовании пластинчатых теплообменников, а в главе 2 представлена разработанная автором конструкция радиально-спирального теплообменника. Требуется пояснить, к какому типу теплообменников относится вновь разработанная конструкция.

5. В диссертационной работе не приведен анализ чувствительности представленной математической модели к изменению теплофизических свойств флюида (коэффициентов вязкости, коэффициентов теплопроводности и плотности) в зависимости от температуры, хотя при постановке задачи (п. 1) этот анализ чувствительности заявлен как важный фактор исследования.

6. Разработанный радиально-спиральный теплообменник состоит из множества сварных тонкостенных элементов. В работе не оценена трудоемкость изготовления и ремонтопригодность такой конструкции по сравнению с традиционными разборными пластинчатыми теплообменниками, которые можно разобрать и промыть.

Приведённые замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение по работе

Диссертационная работа Ахмитшина Алмаза Анасовича «Теплогидравлические характеристики пленочной конденсации пара и интенсификации теплообмена в аппаратах при нагреве сред с повышенной вязкостью» является самостоятельным, законченным научно-квалификационным исследованием, в котором решена актуальная научно-практическая задача – моделирование, экспериментальное изучение и создание методов расчета интенсифицированных пластинчатых теплообменных аппаратов для высоковязких технологических сред, что имеет существенное значение для теплоэнергетики и нефтегазохимического комплекса.

По объёму проведенных исследований, научной новизне, практической ценности и уровню публикации результатов работа полностью удовлетворяет всем требованиям пунктов 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (в действующей редакции),

предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Ахмитшин Алмаз Анасович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника».

Диссертационная работа обсуждена на заседании кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», «28» октября 2026 г., протокол № 2.

Заведующий кафедрой
«Теоретические основы теплотехники»
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
энергетический университет
имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, доцент _____ Бушуев Евгений Николаевич
e-mail: zavkaf_tot@ispu.ru, Тел: +7 (4932) 269-778

Профессор кафедры
«Теоретические основы теплотехники»
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
энергетический университет
имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор _____ Бухмиров
Вячеслав Викторович
e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru, Тел.: +7 (4932) 269-989

Сведения об организации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
Адрес: 153003, Россия, г. Иваново, ул. Рабфаковская, дом 34
Телефон: +7 (4932) 269-999
Электронная почта: office@ispu.ru
Веб-сайт: http://ispu.ru

Подписи Бушуева Е.Н. и Бухмирова В.В. заверяю:

Ученый секретарь Ученого Совета ИГЭУ _____ Вылгина Юлия Вадимовна