**ОТЗЫВ**

**официального оппонента доктора технических наук, профессора Попова Игоря Александровича на диссертационную работу Ахмитшина Алмаза Анасовича «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 специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника»**

**Актуальность темы:**

Актуальность диссертационной работы определяется необходимостью кардинального повышения энергетической и массогабаритной эффективности теплообменного оборудования, эксплуатируемого в ламинарном и переходном режимах течения теплоносителей, характерных для высоковязких жидких углеводородов. Целью диссертационного исследования 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. Поиск и научное обоснование новых пассивных способов интенсификации конвективного переноса, работающих при сверхмалых числах Рейнольдса, представляют фундаментальный и прикладной интерес для современной теплотехники, промышленной нефтехимии и нефтегазопереработки. В связи с этим глубокое экспериментальное изучение, аналитическое описание и создание применимых в инженерной практике верифицированных алгоритмов расчета подобных теплообменных процессов являются своевременными и важными.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника» по следующим направлениям:

– 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.

- Процессы переноса массы, импульса и энергии при свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей и характеристик теплопередающих поверхностей, в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях. Радиационный теплообмен в прозрачных и поглощающих средах.

- Новые конструкции теплопередающих и теплоиспользующих установок и оборудования, обладающих улучшенными эксплуатационными и техникоэкономическими характеристиками. Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров, использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем.

По формуле специальности: научная дисциплина, ориентированная на совершенствование аппаратурного оформления технологических процессов с позиций энерго- и ресурсосбережения.

**Научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследований.** В диссертации Ахмитшина А.А. представлены результаты, обладающие научной новизной:

1. Сформулирована комплексная сопряженная двумерная математическая модель, описывающая в единой системе тепломассообмен и гидродинамику пленочной конденсации пара. Модель объединяет уравнения переноса для трех зон: ограниченного потока хладагента, стекающей пленки конденсата на стенке и парового потока, учитывая при этом нелинейный характер изменения вязкостных и теплофизических свойств сред от температурных градиентов.

2. Проведены экспериментальные исследования пленочной конденсации на примере воды и третбутилового спирта в щелевых каналах. Автором установлено стабилизация теплоотдачи: при критическом росте скорости охлаждающей среды лимитирующей фазой становится термическое сопротивление самой разделительной пластины.

3. Получены опытные данные по гидравлическому сопротивлению и интенсификации теплообмена при течении высоковязкого гидравлического масла в условиях стесненного слоя мелкоразмерной хаотичной насадки «Инжехим-2012». Экспериментально подтверждена высокая сходимость локальных чисел Нуссельта с теоретическими зависимостями.

4. Предложена теоретико-экспериментальная методика оценки тепловой эффективности аппаратов с объемными заполнителями. В основу положено применение ячеечной модели гидродинамической структуры потоков, которая, в отличие от классических схем идеального вытеснения, позволяет корректно учесть масштабные эффекты обратного перемешивания вязких углеводородных сред.

**Теоретическая и практическая значимость:**

1. Практическая ценность результатов заключается в количественном обосновании диапазонов эффективного применения пассивных объемных турбулизаторов. Установлено, что в глубокой ламинарной области (Re = 5…20) хаотичный слой обеспечивает стабильный рост теплоотдачи в 1,5–2 раза, а в переходной зоне (Re = 40...400) провоцирует ранний срыв

ламинарного подслоя, вызывая кратный (в 6–12 раз) рост коэффициентов теплоотдачи, что позволяет кардинально снизить габариты оборудования для вязких сред.

2. Автором разработан инженерный метод расчета теплопередачи, базирующийся на ячеечной модели структуры потоков в насадочном слое. Практическая ценность работы подтверждается внедрением модернизированных теплообменных аппаратов на действующем нефтеперерабатывающем предприятии.

3. Разработаны и защищены патентом РФ (№ 2583316) новые компактные конструкции блочных радиально-спиральных теплообменных модулей из профилированного листа. Предложенные технические решения обеспечивают максимальную удельную поверхность теплообмена в единице объема и ориентированы на импортозамещение в нефтехимическом и топливно-энергетическом секторах.

**Обоснованность и достоверность полученных результатов** базируется на следовании фундаментальным законам сохранения массы, импульса и энергии, взаимном соответствии данных численного и физического моделирования, а также подтверждается актами внедрения полученных результатов в проектно-конструкторскую практику промышленного инжинирингового центра и теплоэнергетических предприятий.

Основные результаты диссертационной работы всесторонне докладывались и обсуждались на крупных научно-технических конференциях всероссийского и международного уровней. Конструктивная новизна предложенного радиально-спирального аппарата закреплена патентом на изобретение Российской Федерации.

**Общая характеристика работы**

Диссертационная работа Ахмитшина А.А. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений.

**Во введении** содержится корректное академическое обоснование актуальности темы, определяется объект, предмет и четкие границы исследования, а также раскрывается структура диссертации и логика изложения материала.

**Первая глава** содержит детальный обзор пассивных интенсификаторов теплоотдачи, среди которых ключевое внимание уделено дискретно-шероховатым поверхностям и хаотичным насадкам. Автором доказана высокая эффективность использования мелкодисперсных хаотичных насадок для турбулизации потоков с повышенной вязкостью при ламинарном течении. Для математического описания локального

теплопереноса в исследуемых каналах в главе предложено и обосновано применение ячеечной модели и принципов квазигомогенной среды.

**Во второй главе** диссертации представлена новая запатентованная конструкция вертикального радиально-спирального теплообменника-конденсатора (патент РФ № 2583316) и приведены результаты экспериментального изучения пленочной конденсации водяного пара и паров органических веществ (третбутилового спирта). Опираясь на выявленные закономерности, соискатель разработал пошаговый инженерный алгоритм расчета и процедуру многокритериальной оптимизации пластинчатых аппаратов. Адекватность и практическая применимость данной методики надежно подтверждаются сопоставлением расчетных показателей с результатами экспериментов.

**В третьей главе** автором предложена двухмерная сопряженная математическая модель ламинарной пленочной конденсации пара, учитывающая переменный характер свойств хладагента и жидкой пленки. Для граничного случая медленного движения жидкости (Re<<1) приведено аналитическое решение краевой задачи по методу Слезкина, а для полной системы уравнений представлен алгоритм численного расчета методом Рунге — Кутты. Проведены исследования конденсации паров воды и третбутилового спирта на авторском стенде, где фиксировалось влияние режимных факторов на общую интенсивность переноса. Расхождение между результатами теоретического моделирования и опытами составило всего 10–15%, что доказывает состоятельность и достоверность математической модели.

**Четвертая глава** посвящена обобщению экспериментальных и расчетных данных по интенсификации теплообмена в пластинчатых и трубчатых аппаратах при ламинарном движении индустриальных масел (HLP 46 и турбинного). Опытным путем доказано, что использование хаотичного слоя мелкой металлической насадки «Инжехим-2012» увеличивает числа Нуссельта в 1,5–2 раза в ламинарной области (Re = 5…20) и в 6–12 раз при переходе к турбулизированному режиму (Re = 40…400). Для выполнения инженерных расчетов автором предложены алгоритмы на основе ячеечной гидродинамической модели, учитывающие фактор обратного перемешивания сред. Точность этих алгоритмов подтверждена сходимостью с экспериментом на уровне 5–10%. В конце главы отражены результаты успешного внедрения созданных технических решений в практику компаний ООО «НТЦ Ахмадуллины» и ООО «Теплобокс-ПКО».

Таким образом, диссертация Ахмитшина А.А. является целостным и завершенным научным трудом, содержащим решение важной научно-практической задачи — исследование теплогидравлики пленочной

конденсации пара и внедрение методов интенсификации конвективного теплообмена для сред с повышенной вязкостью в трубчатых и пластинчатых аппаратах.

Текст работы выстроен в строгой логической последовательности. Предложенный автором единый подход позволил эффективно решить проблемы двумерного математического моделирования сопряженного тепломассопереноса и создать методику расчета насадочных систем, с учетом структуры потоков и обратного перемешивание теплоносителей. Полученные результаты имеют ключевое прикладное значение для выполнения поверочных и конструктивных расчетов компактных высокоэффективных теплообменников.

Обобщения и рекомендации автора могут быть непосредственно применены при проектировании, расчете и модернизации пластинчатых и радиально-спиральных аппаратов, а также систем с объемной интенсификацией на объектах нефтеперерабатывающей, нефтехимической и теплоэнергетической отраслей.

**Рекомендации по использованию научно-технических результатов и выводов диссертации.**

Предложенные в работе экспериментальные данные и зависимости помогают точнее проектировать пластинчатые аппараты, а также находить рациональные размеры интенсификаторов для работы в условиях с применением сред повышенной вязкости. Кроме того, разработанные автором численные модели и расчетные методики имеют прямую практическую ценность. Их целесообразно внедрять на различных промышленных предприятиях при модернизации или создании новых компактных теплообменников-конденсаторов.

**Замечания по диссертационной работе**

При несомненных научных и прикладных достоинствах диссертационного исследования, по работе необходимо высказать следующие замечания и рекомендации:

1. В работе имеется эксперименальное исследование характеристик теплообменных аппаратов при конденсации теплоносителя и сопоставление их с результатами математического моделирования. Отклонение этих данных достигает 10-12%. Однако автор не акцентировал внимание на бюджет неопределенности измерений основных параметров теплообменника и оценку значений неопределенности. Сколько составляет неопределенность измерения величин в натурном эксперименте по которым далее ведутся сравнения.

2. В четвертой главе автор детально анализирует теплогидравлические характеристики пластинчатого и трубчатого типа «труба в трубе». аппарата с

хаотической насадкой Инжехим-2012. Проводилась ли оценка влияния плотности засыпки, ориентации элементов, а проще – повторяемости экспериментов при различных засыпках?.

3. Предложенные в диссертации алгоритмы предпроектного и поверочного тепловых расчетов (параграфы 4.2.5 и 4.2.7) используют ячеечную гидродинамическую модель структуры потоков. Работу следовало бы дополнить краткими рекомендациями по выбору шага итераций или условий сходимости при расчете теплообменников, работающих в широком температурном диапазоне изменения теплофизических свойств масел.

4. С чем связан сложный характер экспериментальной линии Gкон=f(Vхл) на рис.3.6? Методом математического моделирования получено гладкая линия, без переломов.

5. В качестве пожелания – автор по тексту 4 главы не дал ссылки на рисунки интенсификаторов при их описании и расчете. Приходится догадаться и найти их в первой главе.

Перечисленные недостатки не снижают общий высокий уровень диссертации Ахмитшина А. А. и носят скорее рекомендательный или дискуссионный характер. Полученные автором результаты сохраняют свою научную и практическую значимость.

**Заключение**

Основные выводы автора подробно изложены в 21 публикации. Среди них 7 статей вышли в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, кроме того, новизна технических решений подтверждена патентом на изобретение. Материалы работы активно обсуждались на различных научных площадках, включая международные и общероссийские конференции. Выпущенные статьи и автореферат дают детальное представление о проведенных численных и натурных исследованиях и точно отражают суть диссертации.

Уровень решаемых задач соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника».

Диссертационное исследование Ахмитшина Алмаза Анасовича представляет собой глубокий, самостоятельный и полностью завершенный научно-квалификационный труд. В рамках работы успешно решена крупная научно-техническая задача — создание теоретических основ, расчетных моделей и высокоэффективного аппаратурного оформления для процессов теплообмена при переработке и нагреве высоковязких жидких сред, что вносит весомый вклад в развитие промышленной теплотехники и энергосбережения.

По уровню научной новизны, глубине теоретического анализа, объему экспериментальных данных и практической значимости диссертация полностью удовлетворяет жестким требованиям пунктов 9–14 действующего «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (утв. Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Ее автор, Ахмитшин Алмаз Анасович, безусловно заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника».

**Официальный оппонент**
Доктора технических наук, профессор,
заведующий кафедры «Теплотехника и
энергетическое машиностроение»
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Казанский национальный
исследовательский технический
университет им А.Н. Туполева КАИ»
член корреспондент Академии наук РТ

Попов
Игорь Александрович

14.10.2026

Подпись Попова И. А.
заверяю. Начальник управления
делопроизводства и контроля

**Контактные данные:**
ФИО: Попов Игорь Александрович
Ученая степень: доктор технических наук
Ученое звание: профессор
Должность: профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение»
Специальность докторской диссертации: 01.04.14 — «Теплофизика и теоретическая теплотехника (технические науки)
Организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ)
Рабочий адрес: 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10.
Контактный телефон: +7 (843) 231-01-09
e-mail: popov-igor-alex@yandex.ru
E-mail: kai@kai.ru