ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук Гаряева Андрея Борисовича 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 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника»

Актуальность темы. Актуальность исследования обусловлена как теоретическими аспектами, так и практической необходимостью разработки интенсифицированных теплообменных аппаратов, которые при небольших числах Рейнольдса будут обеспечивать передачу высоких тепловых потоков путем турбулизации вязких сред. 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. Исследования в данной области представляют теоретическое и практическое значение для многих отраслей промышленности и энергетики. Актуальными являются как теоретические и экспериментальные исследования, направленные на изучение закономерностей гидродинамики и теплообмена в интенсифицированных теплообменных аппаратах, так и разработка инженерных методов их расчета.

Актуальность диссертации также подтверждается тем, что она выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-43-160008), также в рамках проекта «Студенческий стартап» (1338ГССС15-L/88735) и гранта АН РТ.

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 технико-экономическими характеристиками. Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров, использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем.

Научная новизна. В диссертации **Ахмитшина А.А.** представлены результаты, обладающие научной новизной:

1. Построена математическая модель пленочной конденсации на основе уравнений сохранения импульса, массы и энергии в двухмерной постановке для хладагента в ограниченной области стекающей пленки конденсата по поверхности стенки и паровой фазы с учетом изменения физических свойств в зависимости от температуры теплоносителя.

2. Получены экспериментальные данные по теплогидравлическим характеристикам процесса пленочной конденсации в пластинчатом теплообменнике (ПТ) и проведено сравнение с результатами численного моделирования на основе разработанной автором математической модели. Исследована конденсация воды и третбутилового спирта и установлено влияние расхода хладагента (воды) на количество образующегося конденсата. Установлено,

что при больших расходах хладагента наступает стабилизация процесса пленочной конденсации.

3. На экспериментальном стенде получены новые данные по теплогидравлическим характеристикам нагрева масла в пластинчатом теплообменнике, где в каналах в качестве объемного интенсификатора размещалась мелкая хаотичная металлическая насадка. Получены экспериментальные значения средних коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи для гидравлического масла марки Роснефть HLP 46, а также значения перепада давления. Показано согласование опытных значений коэффициентов теплоотдачи с расчетами по известным выражениям для числа Нуссельта.

4. С применением ячеечной модели гидродинамической структуры потоков теплоносителей в каналах с хаотичными элементами (насадками) получены выражения для расчета коэффициента тепловой эффективности нагрева масел в трубчатых и пластинчатых теплообменниках. Показано влияние структуры потоков на тепловую эффективность аппаратов для вязких сред и согласование с экспериментальными данными.

Теоретическая и практическая значимость.

1. В результате экспериментальных исследований при нагреве гидравлического масла водяным паром (100°С) в пластинчатом теплообменнике установлено, что за счет размещения хаотичной насадки внутри каналов, где теплоносителем является гидравлическое масло, происходит повышение коэффициента теплоотдачи в 1,5-2 раза при числе Рейнольдса от 5 до 20, и в 6-12 раз при числах Рейнольдса от 40 до 400 при переходе от ламинарного режима в турбулентный за счет хаотичных интенсификаторов. Дано сравнение по теплогидравлическим характеристикам теплообменников с другими способами интенсификации.

2. Разработан алгоритм расчета поверхности теплообмена и эффективности теплопередачи в теплообменнике с хаотичными насадками с учетом

гидродинамической структуры потока по ячеечной модели. Теплообменник с интенсификаторами внедрен на промышленном предприятии нефтепереработки.

3. Получен патент на радиально-спиральный теплообменник, а также представлена конструкция пластинчатого теплообменника с объемными интенсификаторами, которые могут использоваться для нагрева углеводородных и иных смесей на промышленных установках предприятий нефтехимии, нефтегазопереработки и ТЭС.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечиваются использованием поверенных средств измерения характеристик исследованных процессов, хорошим согласованием расчётных значений с полученными экспериментальными данными и данными других исследователей, а также успешным внедрением интенсифицированных теплообменных аппаратов на пилотных установках в промышленности.

Результаты диссертационной работы в достаточной мере опубликованы, докладывались и обсуждались на научных конференциях и семинарах. Получен патент на радиально-спиральный теплообменник новой конструкции.

Общая характеристика работы

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

Во введении диссертации обосновывается актуальность разработки и моделирования высокоэффективных теплообменников для турбулизации вязких сред в ламинарном режиме течения, а также формулируются цель, задачи и научная новизна работы. Кроме того, здесь определен объект исследования — радиально-спиральные и пластинчатые аппараты с хаотичными металлическими насадками, раскрыта их научно-практическая значимость и представлены данные об апробации полученных результатов.

В первой главе проведен подробный анализ существующих пассивных методов интенсификации теплообмена, среди которых рассматриваются

дискретно-шероховатые поверхности и объемные хаотичные насадки. Автор обосновывает перспективность применения именно мелких металлических насадок для турбулизации вязких сред в ламинарном режиме и описывает квазигомогенный подход и ячеечную модель для математического моделирования теплопереноса в таких каналах.

Во второй главе детально описывается авторская конструкция вертикального радиально-спирального теплообменника-конденсатора (защищенная патентом № 2583316) и приводятся результаты физического моделирования пленочной конденсации водяного пара и паров третбутилового спирта. На основе полученных данных разработана инженерная методика расчета и многокритериальной оптимизации пластинчатых аппаратов, адекватность которой подтверждена сходимостью расчетных и экспериментальных показателей.

В третьей главе построена двухмерная математическая модель сопряженного тепломассообмена при ламинарном режиме пленочной конденсации пара, учитывающая температурную зависимость физических свойств хладагента и пленки конденсата. Автор описывает аналитическое решение упрощенной краевой задачи для медленных режимов течения ($Re<<1$) с применением приближенного метода Слезкина, а также алгоритм численной реализации модели методом Рунге — Кутты. На специально разработанном стенде проведено физическое моделирование конденсации паров третбутилового спирта (ТБС) и воды для оценки влияния расхода и температуры хладагента на интенсивность процесса. Сравнение результатов вычислительного и натурного экспериментов показало их удовлетворительное согласование с погрешностью в пределах 10–15%, что доказывает адекватность разработанной модели.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования интенсификации теплопередачи при ламинарном движении гидравлического масла HLP 46 и турбинного масла в трубчатых и пластинчатых аппаратах. Автор экспериментально доказал, что

засыпка мелкой металлической насадки «Инжехим-2012» в ламинарной области (при числах Рейнольдса от 5 до 20) увеличивает число Нуссельта в 1,5–2 раза, а при переходе в турбулентный режим (при числах Рейнольдса от 40 до 400) — в 6–12 раз относительно гладких каналов. Для проектного и предпроектного расчетов аппаратов разработаны алгоритмы, базирующиеся на ячеечной гидродинамической модели структуры потоков с учетом обратного перемешивания теплоносителей, которая обеспечивает расхождение с опытными данными не более 5–10%. В завершении главы приводятся данные об успешном внедрении научно-технических разработок на пилотных и лабораторных установках ООО «НТЦ Ахмадуллины» и ООО «Теплобокс-ПКО».

В целом диссертация **Ахмитшин А.А.** является завершённым научным исследованием, в котором решён комплекс актуальных задач, связанных с теплогидравлическими характеристиками пленочной конденсации пара и интенсификацией конвективного теплообмена при нагреве и охлаждении сред с повышенной вязкостью в пластинчатых и трубчатых аппаратах.

Работа отличается целостностью, логической последовательностью изложения и единством подхода, позволяющим преодолеть трудности при двухмерном математическом моделировании сопряженного тепломассообмена и расчёте параметров интенсифицированных систем с учётом структуры потоков и обратного перемешивания теплоносителей. Полученные результаты обладают существенной практической значимостью для предпроектного и поверочного расчёта высокоэффективного компактного теплообменного оборудования.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при проектировании, подборе и модернизации радиально-спиральных и пластинчатых теплообменников-конденсаторов, а также систем объемной интенсификации теплопередачи на предприятиях нефтехимии, нефтегазопереработки и теплоэнергетики.

Рекомендации по использованию научно-технических результатов и выводов диссертации.

Полученные автором зависимости и обобщённые экспериментальные данные позволяют уточнять расчётные методики проектирования пластинчатых теплообменных аппаратов, выбирать оптимальные геометрические параметры объемных интенсификаторов и режимные параметры ведения процессов для сред с повышенной вязкостью.

Численное моделирование, разработанный алгоритм оптимизации и предложенные полуэмпирические выражения могут служить основой для инженерных расчётов, компьютерного моделирования и модернизации компактных радиально-спиральных и пластинчатых теплообменников-конденсаторов на предприятиях нефтепереработки и теплоэнергетики.

Замечания по диссертационной работе

1. Для того, чтобы разработанную автором математическую модель пленочной конденсации удобно было использовать на практике, требуется более конкретно указать диапазоны параметров, при которых она применима.

2. В работе показано преимущество использования мелкой хаотичной насадки «Инжехим-2012» в каналах пластинчатого теплообменника, однако в тексте диссертации (в частности, в главе 4) не приведено подробного описания геометрии единичного элемента этой насадки и ее основных характеристик: свободного объема, удельной площади поверхности и гидравлического диаметра.

3. В параграфе 2.3 при описании алгоритма оптимизации параметров по методу Соболя — Статникова указывается на ключевую роль лица, принимающего решения (ЛПР), однако в работе не приводится способ выбора компромиссного решения между максимальным расходом конденсата и минимальными энергозатратами для реального технологического процесса.

4. В главе 4 экспериментально установлено существенное возрастание коэффициента теплоотдачи от масла (в 6–12 раз) за счет объемной

интенсификации, но экономическая целесообразность этого эффекта могла бы выглядеть более полной, если бы автор привел сопоставительный расчет затрат на преодоление возросшего в 4–6,5 раз гидравлического сопротивления и экономии на капитальных затратах за счет уменьшения габаритов аппарата.

5. Несмотря на то, что автореферат, в основном, полно отражает содержание диссертации, следовало бы привести в нем некоторые дополнительные данные, которые в ней присутствуют, например, полученные автором расчетные зависимости для определения теплогидравлических характеристик исследованных пластинчатых теплообменников.

Указанные замечания не ставят под сомнение полученные в диссертации результаты и выводы, их научную и практическую значимость и не влияют на общую высокую положительную оценку диссертационного исследования Ахмитшина А. А.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 21 научной работе, 7 из них — в научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и приравненных к ним, получен 1 патент на изобретение. Также результаты исследования прошли широкую апробацию на международных и всероссийских научных конференциях, и семинарах. Автореферат и научные статьи, опубликованные автором, достаточно полно отражают основное содержание диссертации, характеризуют результаты выполненных теоретических, численных и экспериментальных исследований.

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

Диссертационная работа Ахмитшина Алмаза Анасовича «Теплогидравлические характеристики пленочной конденсации пара и интенсификации теплообмена в аппаратах при нагреве сред с повышенной

вязкостью» является завершенной научно-квалификационной работой, где решена актуальная задача физического и математического моделирования интенсифицированного теплообмена, пленочной конденсации и повышения тепловой эффективности теплообменных аппаратов для вязких жидких углеводородных сред. Диссертация по критериям актуальности, научной новизны, практической значимости, обоснованности и достоверности выводов полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России, установленным в пп. 9–14 Положения о порядке присуждения ученых степеней (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 в действующей редакции), а соискатель Ахмитшин Алмаз Анасович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника».

Официальный оппонент
Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Энергоэффективные
инженерные системы»
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Национальный
исследовательский университет “МЭИ

Гаряев
Андрей Борисович

29 октября 2026 г.

Подпись официального оппонента заверяю

ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ
...НИК ОТДЕЛА УПРАВЛЕНИЯ
...БОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ
Г. А. ЯРЕМЕНКО

Контактные данные:
ФИО: Гаряев Андрей Борисович
Ученая степень: доктор технических наук
Ученое звание: профессор
Должность: профессор кафедры «Энергоэффективные инженерные системы»
Специальность докторской диссертации: 05.14.04 — «Промышленная теплоэнергетика»
Организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет “МЭИ”»
Рабочий адрес: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14.
Контактный телефон: +7 (8442) 23-00-76
E-mail: GariayevAB@mpei.ru