

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Печеркина Николая Ивановича** «Тепло – и массообмен при течении двухфазных потоков на поверхностях и в каналах сложной формы», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Для тепломассообменного оборудования в энергетике, криогенной и низкотемпературной технике, химической технологии представляют интерес результаты комплексных экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса в различных условиях течения двухфазных газо- и парожидкостных потоков в каналах с различной формой и структурой поверхности. К ним относятся каналы с внезапным расширением и поворотом потока, щелевые каналы компактных теплообменников, многоячеистые каналы регулярных насадок ректификационных колонн, а также структурированные поверхности, применяемые для интенсификации процессов тепломассопереноса в стекающих пленках различных жидкостей.

Рассматриваемые в работе течения двухфазного потока с различным паросодержанием в каналах, изменяющих направление движения и величину поперечного сечения, встречаются во многих элементах энергетического оборудования - трубопроводах, теплообменниках, запорной и регулирующей арматуре. Анализ условий, в которых находятся отдельные элементы оборудования, показывает, что наиболее характерными и опасными являются ударное воздействие капель, кавитационная эрозия, химическая и электрохимическая коррозия. Проведенные исследования течения в прямоугольных миниканалах являются актуальными для расчета и проектирования элементов компактных пластинчатых теплообменников, которые широко используются в энергетике, микроэлектронике, криогенике, авиационной и космической технике, химической технологии и многих других приложениях. Полученные режимы течения двухфазного потока в теплообменниках предназначены для систем ожижения природного газа и криогенных дистилляционных колонн.

В процессах абсорбции, дистилляции, выпаривания основными рабочими жидкостями являются растворы и смеси различных веществ, а пленочное течение является основным режимом течения жидкости. Для интенсификации теплообмена в стекающих пленках как в режиме испарения, так и пузырькового кипения исследованы развитые поверхности.

Одним из основных результатов работы является противоточное течение пара и жидкости в сложных канальных системах структурированных насадок дистилляционной колонны. Рассмотрены основные конструктивные параметры, определяющие закономерности массопереноса в разделительных колоннах. На лабораторных установках получены уникальные данные для проектирования промышленных установок.

Тема рассматриваемой диссертации находится в русле приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ (8. Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика). В работе

разрабатываются критические технологии РФ (27. Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе).

Таким образом, тематику представленной диссертации следует признать актуальной.

Научная новизна работы состоит, прежде всего, в том, что:

- Получены новые опытные данные по распределению локальных коэффициентов массоотдачи на внутренней поверхности канала с поворотом потока и канала с внезапным расширением при течении однофазного и двухфазного потоков. Установлены зоны с повышенными коэффициентами массоотдачи в каналах при различных режимах течения. Получены эмпирические зависимости для максимальных коэффициентов массообмена на внутренней поверхности исследуемых каналов при течении однофазного и двухфазного потоков.

- Получены новые экспериментальные данные по характеристикам волнового пленочного течения жидкого азота при спутном течении пара в узком прямоугольном миниканале. Впервые получены профили распределения толщины пленки жидкого азота по периметру канала при различных режимных параметрах.

- Получены новые опытные данные по теплообмену, волновым характеристикам, по кризису теплоотдачи в стекающих пленках смесей хладонов на структурированных поверхностях различных типов, включая поверхности с сетчатым покрытием и поверхность с микроструктурой.

- Получены новые экспериментальные данные по влиянию режимных параметров, характеристик и способов установки структурированной насадки, условий её орошения на гидравлическое сопротивление и эффективность разделения бинарной смеси в дистилляционной колонне. Впервые получены опытные данные по эффективности разделения смеси и перепаду давления на структурированных насадках с различными углами наклона ребер в колоннах с квадратной и полуцилиндрической формами поперечного сечения. Выявлены основные закономерности по влиянию отношения расходов жидкости и пара, высоты насадки, других параметров на эффективность разделения и перепад давления в колоннах с некруглым поперечным сечением.

Достоверность полученных данных подтверждается оценкой погрешностей экспериментов, калибровкой измерительных датчиков, применением аттестованных средств измерения и измерительных приборов, сравнением с результатами других исследователей и с расчетными зависимостями, оценками тепловых и материальных балансов тепломассообменного оборудования, используемого в экспериментах, воспроизводимостью экспериментальных данных.

Практическая значимость

Результаты исследования влияния газосодержания на интенсивность массопереноса на стенке криволинейного канала и канала с внезапным расширением, а также зависимости для максимальных коэффициентов массоотдачи на стенках каналов сложной формы, полученные в данной

работе, могут быть использованы при разработке конструкций новых тепломассообменных аппаратов с двухфазными потоками, а также для теоретического описания процесса коррозионно-эрозионного износа каналов в системах циркуляции теплоносителя в энергетическом и химическом оборудовании. Данные по режимам течения пленки жидкого азота и спутного потока пара в прямоугольном миниканале важны для выбора методик расчета теплообмена в каналах компактных теплообменников, могут быть использованы при проектировании установок для ожижения природного газа, дистилляционных установок, тепловых насосов и холодильных машин. Полученные результаты по интенсификации теплообмена при пленочном течении маловязких жидкостей и их смесей на структурированных поверхностях различных типов необходимы для анализа и выбора оптимальных режимов работы тепломассообменных аппаратов с подобными рабочими средами. Эти результаты могут быть использованы при разработке и внедрении в промышленное производство структурированных труб и других поверхностей, предназначенных для интенсификации тепломассообмена при пленочных течениях жидкости. Результаты исследований по гидродинамике будут полезны при моделировании и расчете процессов, связанных с течением жидкости на структурированных поверхностях: в насадках дистилляционных колонн, в выпарных аппаратах, в теплообменниках и других технических приложениях, использующих пленочные течения жидкости. Результаты по эффективности разделения, перепаду давления, распределению локальных расходов жидкости, состава смеси на структурированных насадках различной формы, полученные в данной работе, важны для проектирования современных раздельных колонн и для обоснованного выбора типов насадок и режимов работы отдельных секций колонн с учетом реальных условий по расходам жидкости и пара, высоте колонны и других параметров.

Структура. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 311 страниц, включая 176 рисунков. Библиография включает 315 наименований.

Во введении дано краткое описание рассматриваемых в диссертации вопросов, показана их актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, аргументирована научная новизна исследований, представлены выносимые на защиту научные положения, показана научная и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлены результаты исследования массопереноса при течении однофазных и двухфазных потоков в каналах с поворотом потока на 90град и с внезапным расширением. Описан механизм коррозионных повреждений трубопроводов и других элементов оборудования на тепловых и атомных электростанциях. Указано, что скорость износа участков трубопроводов сложной геометрии определяется различными факторами, в том числе скоростью подвода коррозионно-активных примесей и уноса продуктов коррозии потоком, т.е. интенсивностью массообмена на поверхности. Приведен обзор литературы по измерению коэффициентов тепло- и массоотдачи в каналах сложной формы,

применяющихся во многих элементах энергетического оборудования атомных и обычных тепловых электростанций - теплообменниках, трубопроводах, запорной и регулирующей арматуре. Приведено описание экспериментальной установки и метода исследования локальных коэффициентов массоотдачи. Получены новые опытные данные по распределению локальных коэффициентов массоотдачи на внутренней поверхности канала с поворотом потока и канала с внезапным расширением при течении в них однофазного и двухфазного газожидкостного потоков. Получены эмпирические зависимости для максимальных коэффициентов массоотдачи в канале за сечением расширения и в канале с поворотом потока, определены положение зон с наибольшими коэффициентами массоотдачи и степень интенсификации массообмена по сравнению с прямыми трубами.

Во второй главе приведены результаты исследования опускного течения жидкого азота с потоком пара в вертикальном прямоугольном миниканале. Приведена классификация размеров каналов, примеры компактных теплообменников с миниканалами, а также области их применения. Наиболее широко прямоугольные миниканалы с размерами от одного до нескольких миллиметров используются в теплообменном оборудовании в авиационной промышленности, в криогенной и холодильной технике. Из обзора литературы следует, что данные по режимам течения жидкого азота и спутного потока пара в прямоугольных миниканалах отсутствуют. Приведено описание экспериментальной установки, рабочего участка и методики исследования режимов течения жидкого азота и спутного потока пара в вертикальном прямоугольном миниканале. Проанализированы результаты исследования режимов опускного течения жидкого азота в прямоугольном миниканале. Получены профили распределения толщины пленки жидкого азота по периметру канала при различных режимных параметрах. Определен диапазон расходов жидкости, в котором толщина пленки на узкой и на широкой стенках существенно различается. Определена величина расхода пара, при которой происходит выравнивание распределения пленки жидкого азота по периметру прямоугольного миниканала, режим течения становится подобным дисперсно-кольцевому режиму в круглой трубе.

В третьей главе приведены результаты исследования теплообмена при испарении и кипении в стекающих пленках низкокипящей жидкости на структурированных поверхностях различных типов: на профилированных поверхностях с размерами шероховатости порядка капиллярной постоянной (горизонтальное оребрение синусоидальной формы, накатка ромбовидной формы), на микроструктурированных поверхностях с полужамкнутыми полостями, на гладкой поверхности с внешней шероховатостью в виде проволочных сеток. Рассмотрены особенности теплообмена в бинарной смеси: приведена фазовая диаграмма смеси, даны оценки изменения состава смеси и расхода жидкости в стекающей пленке в зависимости от величины теплового потока, показано незначительное влияние состава смеси на коэффициенты теплоотдачи. Впервые получены опытные данные по теплоотдаче и критическому тепловому потоку в стекающей пленке на

поверхности с микроструктурой, представляющей комбинацию микроребер с подповерхностными полостями. Достигнута значительная интенсификация теплообмена в режиме пузырькового кипения. Критический тепловой поток близок к величине теплового потока полного испарения. Определены области режимных параметров, в которых имеет место интенсификация теплообмена на структурированных поверхностях.

В четвертой главе приведены результаты исследования тепломассопереноса при противоточном течении жидкости и пара в каналах структурированных насадок в процессе разделения смесей в ректификационной колонне. Приведены характеристики структурированных насадок, широко используемых в различных технологиях дистилляционного разделения: при получении криогенных продуктов, в химической, нефтяной, пищевой и других отраслях промышленности. Поверхность листов насадки имеет перфорацию и сложный рельеф в виде выступов или мелких волн. Описаны результаты экспериментального исследования и получены новые опытные данные по влиянию отношения расходов жидкости и пара, угла вращения слоёв, высоты насадки и удельной поверхности на перепад давления и эффективность разделения смеси. Обнаружено влияние отношения расходов жидкости и пара на эффективность разделения. С увеличением высоты упаковки структурированной насадки происходит увеличение высоты единицы переноса и высоты, эквивалентной теоретической тарелке. Впервые получены опытные данные по эффективности разделения смеси и перепаду давления в колоннах с квадратной и полуцилиндрической формами поперечного сечения, проведено их сравнение с данными для круглой колонны. Выявлены области режимных параметров и характеристики насадок, для которых имеет место влияние формы поперечного сечения на эффективность разделения смесей. Основные закономерности по влиянию высоты насадки, отношения расходов жидкости и пара, других режимных параметров на эффективность разделения смесей и перепад давления, полученные для круглых колонн, действительны и для колонн с некруглым поперечным сечением.

Заключение на двух страницах суммирует выводы по работе.

Работа прошла широкую апробацию. Результаты работы опубликованы в ведущих профильных журналах: Chemical Engineering and Processing, Heat Transfer Engineering, Journal of Engineering Thermophysics, Intern. Journal of Heat and Mass Transfer, AIChE Journal, Теплофизика высоких температур, Теплофизика и аэромеханика, Microgravity Sci. Technology, Приборы и техника эксперимента, Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук и др.

В целом, диссертация производит положительное впечатление. Изложение материала хорошо структурировано и систематизировано, автор использует общепринятые специальные термины и предлагает свои. Совокупность приведенных данных и результатов с уверенностью позволяет судить о квалификационной состоятельности диссертационной работы.

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника по п. 5 «Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной

конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей».

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

По представленной диссертационной работе имеется ряд вопросов и замечаний.

1. Цель и задачи по каждому разделу вынесены во введение (!) диссертационной работы. Обычно они указываются (можно было продублировать) по тексту диссертации после аналитических обзоров, являясь результатом анализа и постановкой дальнейших конкретных задачи исследований. А так приходится постоянно после обзора смотреть введение, а потом возвращаться к тексту главы. Неудобно!
2. В основном использован термин погрешность, хотя согласно ГОСТ Р 54500.3-2011 и ГОСТ 34100.1-2017 используется термин и расчет неопределенности.
3. В работе не вполне полно описано обоснование 2 пиков на графике распределения коэффициентов массоотдачи в зоне присоединения потока при внезапном расширении потока. Чем вызваны малое расстояние ( $x/d$  около 2) точки присоединения потока и малая зависимость его от числа  $Re$ ? Почему оказывает влияние температура потока на расслоение зависимости коэффициента теплоотдачи за точкой присоединения?
4. По главе 3 нет конкретных рекомендаций по выбору рациональных параметров микроструктурированных поверхностей. Диапазон исследований включает только 2 типоразмера. Получено 3 кратное увеличение теплоотдачи при кипении пленки стекающей жидкости. Как использовать полученные результаты?
5. При описании работы в диссертации и автореферате чаще всего идет описание полученных результатов, имеется анализ. Но автор не выделяет по тексту конкретные рекомендации для практического использования в различных видах.
6. Практическая значимость работы показана только словесным повествованием списка общих названий технических устройств и отраслей промышленности. Обычно указывают конкретные устройства, договора и гранты, в рамках которых поддерживались исследования.
7. Автореферат не содержит фамилий ученых, предшественников данных исследований. Складывается впечатление о пионерских разработках. Но в то же время в диссертации имеются обзоры и ссылки на предшествующие работы.

Вышеприведенные замечания и вопросы не меняют общей оценки рассматриваемой работы, которая является законченным научным исследованием по тепло – и массопереносу при течении двухфазных газо- и парожидкостных потоков в каналах с различными масштабами, формой и структурой поверхности, результаты которого являются основой для

создания высокоэффективного теплообменного оборудования в энергетике, криогенной и низкотемпературной технике, химической технологии.

Диссертация Печеркина Николая Ивановича «Тепло- и массообмен при течении двухфазных потоков на поверхностях и в каналах сложной формы», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук полностью соответствует п.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 «О порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013., а Печеркин Николай Иванович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальностям 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Профессор кафедры «Теплотехника  
и энергетическое машиностроение»  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ»  
д.т.н., проф.



Попов Игорь  
Александрович

«18» марта 2019 г.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ»

Адрес организации: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

тел/факс: (843) 238-55-50 / 231-01-02

e-mail: porov-igor-alex@yandex.ru

