



Минобрнауки России
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский
университет «МЭИ»

111250, Россия, Москва,
Красноказарменная ул., 14,
Тел.: (495) 362-75-60, факс: (495) 362-89-38
E-mail: universe@mpei.ac.ru
<http://www.mpei.ru>

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский уни-
верситет «МЭИ», доктор технических
наук, профессор



В.К. Драгунов

«04» марта 2019 г.

№ _____

« _____ » _____ 20__ г.

ОТЗЫВ

ведущей организации 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 специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Актуальность исследований

Диссертационная работа Печеркина Николая Ивановича посвящена экспериментальному исследованию процессов тепло- и массопереноса при течении двухфазных потоков в каналах сложной формы, моделирующих элементы тепломассообменных аппаратов в энергетике, криогенной и низкотемпературной технике, химической технологии. В работе были изучены каналы с внезапным расширением и поворотом потока, щелевые каналы компактных теплообменников, каналы регулярных насадок ректификационных колонн, а также структурированные поверхности, применяемые для ин-

тенсификации процессов тепломассопереноса в стекающих пленках различных жидкостей. Актуальность исследований процессов тепломассопереноса в этих условиях определяется необходимостью обеспечения безопасности работы высоконапряженного энергетического оборудования и недостатком данных по режимам совместного течения газа и жидкости в каналах сложной формы. Остается актуальным поиск оптимальных форм и размеров структурированных поверхностей для интенсификации тепломассообмена в стекающих пленках как чистых жидкостей, так и смесей веществ. Исследование масштабных факторов при противоточном течении пара и жидкости и влияния на тепломассоперенос структуры поверхности и формы как единичных каналов, так и дистилляционных колонн в целом, также является весьма актуальным для снижения энергозатрат и повышения эффективности процесса разделения смесей.

Диссертационная работа состоит из Введения, четырех глав, Заключение и списка литературы. Диссертация изложена на 311 страницах, включая 176 рисунков, 11 таблиц, библиографический список из 315 наименований.

Во Введении дано краткое описание рассматриваемых в диссертации вопросов, обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту. Показаны научная новизна результатов, их достоверность и практическая значимость. Отмечен личный вклад соискателя в получение результатов диссертации, представлена информация по апробации результатов работы.

В главе 1 представлены результаты экспериментального исследования массопереноса на стенках канала с поворотом потока на 90 градусов и канала с внезапным расширением при течении однофазных и двухфазных потоков. Описан механизм коррозионных повреждений трубопроводов и других элементов оборудования на тепловых и атомных электростанциях, связанный с интенсивностью массопереноса на внутренней поверхности каналов. Из обзора литературы следует, что данные по массопереносу в двухфазных потоках в каналах сложной формы немногочисленны, получены, как правило, с помощью непрямых методов измерения. Приведено описание используемой экспериментальной установки, электрохимического метода измерения локальных коэффициентов массоотдачи на стенках каналов сложной формы, дана оценка погрешностей измерений.

Исследовано влияние расхода однофазного и двухфазного потоков на интенсификацию массообмена на внутренней поверхности изогнутого канала и канала с внезапным расширением. Предложены эмпирические зависимости для максимальных коэффициентов массоотдачи в канале за сечением расширения и в канале с поворотом потока, определено положение зон с

наибольшей интенсификацией массообмена по сравнению с прямыми трубами.

В главе 2 приведены результаты исследования опускного течения жидкого азота со спутным потоком пара в вертикальном прямоугольном мини-канале с размером поперечного сечения $2.6 \times 7.1 \text{ мм}^2$. Для исследования режимов течения использовались визуализация, фото- и видеосъемка, измерения локальной толщины пленки на широкой и узкой стенках канала проведены емкостным методом. Показано, что течение жидкости на широкой и на узкой стенках при малых числах Рейнольдса является независимым, соответственно толщина пленки, амплитудно-волновые характеристики и числа Рейнольдса на них существенно различаются. В результате перетока жидкости в углы мини-канала толщина пленки на широкой стенке уменьшается более чем в два раза по сравнению с расчетной зависимостью Нуссельта. Показано, что при больших расходах спутного потока пара происходит выравнивание распределения пленки жидкого азота по периметру прямоугольного мини-канала, а амплитудно-волновые спектры пленки жидкости на узкой и на широкой сторонах канала становятся практически одинаковыми.

В главе 3 приведены результаты экспериментального исследования теплообмена и кризиса при испарении и кипении в стекающих пленках смесей фреонов на гладких и структурированных поверхностях различных типов. Дается описание установки, параметров структурированных поверхностей, методики измерения коэффициентов теплоотдачи в стекающих пленках смесей фреонов, дана оценка погрешностей измерений основных величин.

Показано, что поверхностные структуры, имеющие характерные размеры порядка капиллярной постоянной для используемых в экспериментах жидкостей, а также сетчатые покрытия на поверхности способствуют интенсификации теплообмена в режиме испарения стекающих пленок в ламинарно-волновом режиме течения. Интенсификация теплообмена в режиме пузырькового кипения и значительное увеличение критического теплового потока были достигнуты на поверхности с полужамкнутыми подповерхностными полостями с характерным размером 100-200 мкм, созданными методом деформирующего резания. В работе проведено обобщение опытных данных, приведено сравнение с результатами других исследователей.

В главе 4 приведены результаты экспериментального исследования тепломассопереноса при противоточном течении жидкости и пара в сложных канальных системах структурированных насадок в процессе разделения смесей в крупномасштабной модели дистилляционной колонны. Показано влияние числа слоёв структурированной насадки, способов их установки в

дистилляционную колонну на гидравлическое сопротивление и эффективность разделения бинарной смеси.

Получены опытные данные по эффективности разделения смеси и перепаду давления в колоннах с квадратной и полуцилиндрической формами поперечного сечения. Эти исследования связаны с новым направлением в разделении многокомпонентных смесей — созданием колонн с разделительными стенками. Полученные результаты показывают существенное влияние формы поперечного сечения колонны на эффективность разделения смесей для структурированных насадок с углом наклона ребер 45 градусов. В то же время, форма поперечного сечения колонны не влияет на эффективность разделения смесей и перепад давления на насадке с углом наклона ребер 60 градусов. Основные закономерности, определяющие влияние 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.

Выводы по результатам работы приведены по каждой из глав, основные результаты сформулированы в общем **Заключении** по диссертации.

Научная новизна результатов диссертационной работы Н.И. Печеркина. Получены новые экспериментальные данные и эмпирические зависимости для максимальных коэффициентов массоотдачи в канале за сечением расширения и в канале с поворотом потока при течении в них однофазного и двухфазного газожидкостного потоков, определено положение зон с наибольшими коэффициентами массоотдачи и степень интенсификации массообмена по сравнению с прямыми трубами.

Выявлено, что течение пленки жидкости на широкой и узкой стенках прямоугольного мини-канала при малых расходах является независимым. Получены профили распределения толщины пленки жидкого азота по периметру мини-канала, определены условия выравнивания распределения пленки жидкости по периметру при спутном потоке пара.

Впервые получены опытные данные о теплоотдаче и критическом тепловом потоке в стекающих пленках жидкостей на микроструктурированных поверхностях с подповерхностными полостями, полученными методом деформирующего резания. Достигнута значительная интенсификация теплообмена в режиме пузырькового кипения. Показано, что критический тепловой поток на таких поверхностях близок к величине теплового потока полного испарения. Определены области режимных параметров, в которых имеет место интенсификация теплообмена в режимах испарения и

пузырькового кипения на структурированных поверхностях различных типов.

Получены новые экспериментальные данные о влиянии режимных параметров, характеристик и способов установки структурированной насадки, условий её орошения на гидравлическое сопротивление и эффективность разделения бинарной смеси в дистилляционной колонне. Количественно определено влияние отношения расходов жидкости и пара на эффективность разделения смесей.

Впервые получены опытные данные по эффективности разделения и перепаду давления на структурированных насадках с различными углами наклона ребер в колоннах с квадратной и полуцилиндрической формами поперечного сечения. Выявлены области режимных параметров и характеристики насадок, для которых имеет место влияние формы поперечного сечения на эффективность разделения смесей. Показано, что полученные для круглых колонн закономерности, связывающие эффективность разделения смесей и перепад давления с высотой насадки, отношением расходов жидкости и пара, действительны и для колонн с некруглым поперечным сечением.

Достоверность полученных данных подтверждается корректной 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 теплообменного оборудования, используемого в экспериментах, воспроизводимостью экспериментальных данных.

Практическая значимость результатов исследований. Полученные в диссертационной работе Н.И. Печеркина результаты могут быть использованы при разработке конструкций новых теплообменных аппаратов с двухфазными потоками в системах циркуляции теплоносителя в энергетическом и химическом оборудовании, при проектировании, модернизации и эксплуатации установок для ожижения природного газа, дистилляционных установок, тепловых насосов и холодильных машин.

Результаты по интенсификации теплообмена при пленочном течении маловязких жидкостей и их смесей на структурированных поверхностях могут быть использованы при разработке и внедрении в промышленное производство структурированных труб и поверхностей, предназначенных для интенсификации теплообмена в стекающих пленках.

Комплексные исследования перепадов давления, распределения локальных расходов жидкости, состава смеси на структурированных насадках различной формы важны для проектирования современных разделительных колонн и для обоснованного выбора типов насадок и режимов работы отдельных секций колонн с учетом их реальных характеристик.

Результаты диссертационной работы целесообразно использовать в проектных и научно-исследовательских организациях, занимающихся исследованием, разработкой и модернизацией теплообменного оборудования, в котором рабочей средой являются двухфазные газо- и парожидкостные потоки: в ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), ФГБУН Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН), ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ», ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЕ РАН), АО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций» (АО «ЭНИЦ») концерна «Росатом», ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН), ФГБУН Институт теплофизики Уральского отделения РАН (ИТФ УрО РАН), ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева г. Иркутск, Федеральном исследовательском центре «Казанский научный центр РАН», ООО «Инженерно-внедренческий центр «Инжехим» г. Казань, ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», ФГУП РНЦ «Прикладная химия» Санкт-Петербург, в профильных отраслевых НИИ и предприятиях по разработке оборудования тепловой и атомной энергетики, криогенной и низкотемпературной техники, химической технологии.

Результаты проведенных исследований, в том числе обобщенные в монографии «Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Володин О.А. «Теплообмен и кризисные явления в стекающих пленках жидкости при испарении и кипении» Изд-во СО РАН, г. Новосибирск 2016 г.», также целесообразно рекомендовать для студентов вузов и аспирантов в учебном процессе при подготовке специалистов соответствующего профиля в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский университет им. А.Н. Туполева КАИ» (КНИТУ-КАИ), ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет, ФГАОУ ВО «Ивановский государственный химико-

технологический университет, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ).

Публикации

По теме диссертации соискателем опубликованы 44 работы, из них в рецензируемых изданиях из перечня ВАК 24 (12 в международных изданиях), 1 патент, 1 монография, 1 глава в книге, 17 публикаций в прочих изданиях и трудах конференций. Результаты работы докладывались на многочисленных профильных отечественных и международных конференциях.

Замечания по диссертации

1. Электролит, используемый в экспериментах по исследованию коэффициентов массоотдачи в каналах сложной формы, разлагается при температурах 70-80 °С. Таким образом, диапазон режимных параметров, исследуемых автором, ограничен. В работе не указано, в какой мере могут быть использованы полученные опытные данные при проектировании энергетического оборудования с более высокими рабочими параметрами.
2. При описании электродиффузионного метода определения коэффициентов массоотдачи не затрагивается вопрос о временном разрешении используемых датчиков массоотдачи и, соответственно, о возможности получения с их помощью пульсационных характеристик двухфазных потоков.
3. В тексте в нескольких местах рядом используются термины «коэффициент массообмена» и «коэффициент массоотдачи», понятие «коэффициент массообмена» не определено.
4. Не приводится информация о составе аппаратно-программных средств, используемых для регистрации сигналов микро-термопар. В то же время требуемая разрешающая способность определения температуры порядка 0.1 °С. Имело смысл дать описание структуры и состава АСНИ.

Отмеченные замечания не изменяют общую положительную оценку работы. Из детального анализа диссертационной работы следует, что автором проведено комплексное экспериментальное исследование тепло- и массопереноса в каналах сложной формы в различных условиях течения двухфазной среды. Материал диссертационной рабо-

ты изложен последовательно и развернуто, подробно проиллюстрирован рисунками, фотографиями и таблицами.

Общее заключение

Вопросы, рассмотренные в диссертации, соответствуют паспорту специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» для технических наук (п. 6, 7, 9).

Содержание автореферата и сформулированные в нем выводы полностью соответствуют представленным в диссертации результатам исследований.

Публикации отражают основные положения и результаты диссертационной работы. В диссертации Н.И. Печеркина корректно указываются ссылки на источники цитируемых материалов.

Диссертация Печеркина Н.И. обладает внутренним единством, представляет собой законченное и самостоятельное исследование, в котором решена актуальная задача тепло- и массопереноса при течении двухфазных газо- и парожидкостных потоков в каналах с различными масштабами, формой и структурой поверхности. Выявленные диссертантом новые закономерности тепломассопереноса и практические рекомендации являются основой для разработки и создания высокоэффективного тепломассообменного оборудования в энергетике, криогенной и низкотемпературной технике, химической технологии.

По объему, научному уровню, актуальности и новизне полученных результатов, их научной и практической ценности диссертационная работа «Тепло- и массообмен при течении двухфазных потоков на поверхностях и в каналах сложной формы» полностью соответствует критериям, предъявляемым к докторским диссертациям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», а её автор Печеркин Николай Иванович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Обсуждение диссертации Н.И. Печеркина проведено на заседании кафедры Инженерной теплофизики НИУ «МЭИ» 13 февраля 2019 г., работа представлена автором лично. На заседании присутствовало 17 человек профессорско-преподавательского состава. Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании кафедры Инженерной теплофизики НИУ «МЭИ» 13 февраля 2019 г., протокол № 1/2019 от 13.02.2019.



Тел. +7 (495) 3627501
e-mail: deniger@mail.ru

[Signature]

Свири

Tracy

