

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 специальности

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Актуальность темы диссертации.

Разработка новых технологий и совершенствование современных во многих отраслях промышленности происходит с использованием теплоты. При этом, как правило, затрачиваются большие энергоресурсы. Энергоэффективность производств и отдельных технологических циклов во многом определяется интенсивностью тепло (часто и массо-) обменных процессов в конкретных трактах или зонах технологических систем. Важными при этом являются задачи как интенсификации тепломассообмена, так и охлаждения технологического оборудования. В этой связи возникают, как правило, задачи прогноза основных характеристик тепломассообменных процессов при течении одно- или двухфазных (чаще всего парокапельных) потоков в каналах сложной формы и при обтекании разного рода поверхностей, охлаждение которых необходимо. Можно отметить, что в последние 15-20 лет достаточно часто с целью интенсификации процессов отвода (или подвода) теплоты рассматриваются в качестве поверхностей теплообмена не гладкие, а модифицированные (или, другими словами, развитые) поверхности (покрытые лунками, каналами, выступами). Но, закономерности теплофизических процессов, протекающих, при движении двухфазных потоков параллельно таким поверхностям изучены пока плохо. Так, например, если рассматривать публикации в авторитетных российских и зарубежных журналах в последние 15-20 лет, можно сделать обоснованный вывод, что полученных к настоящему времени экспериментальных данных недостаточно для создания общей теории тепло- и массообмена при движении

двухфазных потоков в каналах сложной формы и с модифицированными (развитыми) различными способами поверхностями. В этой связи тема диссертации Н.И. Печеркина, целью которой является экспериментальное исследование процессов тепло- и массопереноса в различных условиях течения двухфазных газо- и парожидкостных потоков в каналах с различной формой и структурой поверхности, охватывающих диапазон размеров, характерных для тепломассообменного оборудования в энергетике, криогенной и низкотемпературной технике, химических технологий, безусловно, актуальна.

Оценивая актуальность темы диссертации Н.И. Печеркина, следует также отметить, что по своему содержанию и достигнутым результатам она полностью соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» (утверждено указом Президента РФ № 899 от 07 июля 2011 года).

Общая характеристика работы.

Рукопись диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников, который включает 315 наименований. Рукопись содержит 311 страниц, включая 176 рисунков и 8 таблиц.

Во введении автор диссертации кратко излагает сущность проблемы, на решение которой ориентирована диссертация, обосновывает актуальность темы; формулирует цель и задачи исследования, защищаемые положения; обосновывает научную и практическую значимость полученных им результатов.

В первой главе приведены результаты экспериментальных исследований процессов массопереноса при течении однофазных и двухфазных потоков в каналах с дискретным расширением и с поворотом потока на 90^0 . Достаточно подробно описаны использовавшаяся экспериментальная установка и метод измерения локальных коэффициентов массоотдачи (электродиффузионный), приведены погрешности измерения основных характеристик исследованных процессов (приведенных скоростей жидкости и газа, объемного расходного газосодержания и коэффициента массоотдачи). По результатам экспериментов с

однофазными и двухфазными потоками установлено, что ввод газа в поток жидкости существенно изменяет распределение локальных коэффициентов массоотдачи по внутренней поверхности изогнутого канала, интенсификация массопереноса при этом достигает 60% на выходе из канала. На отдельных участках поверхности канала наибольшие величины относительных коэффициентов массоотдачи достигают значений 3-4. Сформулирована гипотеза по механизму влияния газосодержания на интенсивность массоотдачи и влиянию этого процесса на интенсивность коррозии трубопроводов тепловых и атомных электростанций. По результатам исследований в каналах с различной степенью расширения установлено распределение локальных коэффициентов массоотдачи по длине канала с дискретным расширением в зависимости от газосодержания в жидкости. Результаты выполненных экспериментальных исследований обобщены в виде аппроксимационного выражения для максимального коэффициента массоотдачи в канале с внезапным расширением.

Вторая глава рукописи диссертации посвящена изложению результатов исследований опускного течения жидкого азота с потоком пара в вертикальном миниканале прямоугольного поперечного сечения. Приведено описание экспериментальной установки и методики исследования режимов течения жидкого азота и спутного потока пара в вертикальном канале (использовались видеосъемка и емкостный метод измерения, адаптированный для работы с криогенными жидкостями). Зарегистрированы изменения во времени толщины пленки жидкого азота при разных числах Рейнольдса. Установлено, что режимы течения таких пленок на широкой и узкой стенках канала являются независимыми (каждый характеризуется своими волновыми характеристиками и средней толщиной пленки) при Re менее 1000. При числах Рейнольдса выше 1000 эти два течения становятся взаимосвязанными. На узкой и широкой стенках канала возникают волны большой амплитуды. Выделены особенности формирования пленок в рассматриваемых условиях – установлено, что средняя толщина пленки на широкой стенке канала в результате перетока жидкости на узкую стенку

становится более чем в два раза меньше расчетной по формуле Нуссельта. Для режимов опускного течения жидкого азота при спутном потоке пара выделены особенности волнового течения пленок — под действием пара при переходе к дисперсно-кольцевому течению толщина пленки выравнивается по периметру прямоугольного миниканала.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований теплообмена при испарении и кипении в стекающих пленках низкокипящей жидкости на структурированных разным образом поверхностях: на профилированных поверхностях с размерами шероховатости близкими к 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. Для проведения этих экспериментов также разработана оригинальная методика и создана экспериментальная установка. Результатами проведенных экспериментов являются распределения локальных коэффициентов теплоотдачи по длине рабочих участков (с разной структурой поверхности). Установлены условия образования сухих пятен при различных расходах жидкости. Сравнение коэффициентов теплоотдачи на рабочих участках с горизонтальным оребрением и ромбовидной структурой показало, что при малых числах Рейнольдса интенсивность теплоотдачи оребренной поверхности на 10-20% ниже, чем на гладкой во всем диапазоне изменения тепловых потоков. Незначительное увеличение коэффициента теплоотдачи зарегистрировано на поверхности с ромбовидной структурой в режиме испарения (по сравнению с гладкой поверхностью). С ростом тепловых потоков эти коэффициенты снижаются на поверхности с ромбовидной структурой по сравнению с гладкой. При больших Re относительные коэффициенты теплоотдачи меняются с ростом теплового потока немонотонно — при q до 1.5×10^4 Вт/м² растут, затем с ростом q снижаются на всех исследованных поверхностях. Также установлено, что при развитом пузырьковом кипении коэффициенты теплоотдачи на

структурированных и на гладких поверхностях практически идентичны. Сформулирована гипотеза по механизму установленных в экспериментах процессов. Выполнено обобщение данных по теплоотдаче при кипении в стекающих пленках на разных поверхностях. Установлено хорошее соответствие полученных экспериментальных значений чисел Нуссельта аппроксимационному выражению, полученному И.И. Гогониным для кипения в стекающих пленках на гладкой поверхности. В этой же главе представлены результаты экспериментальных исследований по теплообмену в стекающей пленке на поверхностях с микроструктурной и с внешней шероховатостью в виде проволочных сеток. Проведен анализ теплообмена в режимах испарения и пузырькового кипения. По результатам экспериментов выполнено обобщение опытных данных по критическому тепловому потоку в стекающих пленках на поверхностях с различной структурой.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований тепломассопереноса при противоточном движении жидкости и пара в каналах структурированных насадок в процессе разделения смесей в ректификационной колонне. Для проведения экспериментов разработана методика и создана крупногабаритная установка с целью исследования гидродинамики и массопереноса при противоточном течении пара и жидкости в сложных канальных системах структурированных насадок в дистилляционных колоннах. По результатам проведенных экспериментов установлено влияние режимных параметров, характеристик структурированной насадки и способов ее установки в разделительную колонну на эффективность разделения и гидравлическое сопротивление.

Общая методология и методика исследования.

Методики исследований, применяемые в диссертации, включают в себя совокупность экспериментальных подходов к изучению тепло- и массообмена при течении двухфазных потоков на структурированных поверхностях и в каналах сложной формы. Автор диссертации разработал группу методик

экспериментального исследования и создал несколько оригинальных установок для реализации этих методик. При их разработке автор диссертации использовал современные представления о течениях жидкостей в микроканалах со структурированными поверхностями и в каналах сложной конфигурации. При планировании, организации, проведении экспериментальных исследований и обработке результатов большое внимание автор уделил анализу систематических и случайных погрешностей результатов измерений. После анализа и обобщения установленных при проведении экспериментальных исследований основных закономерностей исследуемых в диссертации сложных теплофизических и гидродинамических процессов Н.И. Печеркин сформулировал группу физических моделей и гипотез о механизмах тепло- и массопереноса в рассматриваемых в диссертации условиях движения двухфазных потоков. Можно отметить, что все выводы и заключения автора соответствуют современным представлениям о физике процессов переноса массы, импульса и энергии при течениях жидкостей в условиях интенсивного тепло- и массообмена.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендации, сформулированных в диссертации.

Достоверность полученных автором диссертации результатов и, соответственно, защищаемых положений и выводов определяется высоким уровнем метрологической проработки всех разделов диссертации. Выполнен очень большой объем сложных по подготовке, проведению и обработке результатов (которые в полной мере соответствуют критерию фундаментальности) экспериментальных исследований теплофизических и гидродинамических процессов при течении двухфазных потоков на поверхностях и в каналах сложной формы. Для регистрации основных характеристик исследовавшихся процессов использовались разработанные автором методики и алгоритмы, а также апробированные при проведении экспериментальных исследований других авторов. В каждом разделе диссертации приведены численные значения систематических и случайных погрешностей результатов

измерений. Этой части работы автор уделил много внимания, поэтому каких-то сомнений в достоверности результатов экспериментов не может быть. Все основные выводы и защищаемые положения сформулированы Н.И. Печеркиным на основании детального анализа и последующего обобщения результатов выполненных им экспериментов. Результаты, полученные Н.И. Печеркиным, многократно апробировались на авторитетных международных и всероссийских конференциях, что также является косвенным доказательством достоверности и обоснованности основных результатов и выводов представленных в диссертации Н.И. Печеркина.

Научная новизна полученных результатов.

Н.И. Печеркиным получена большая группа результатов экспериментальных исследований фундаментального значения, соответствующих критерию новизны. Последнее подтверждается публикациями статей в журналах РАН и международных, входящих в список периодических изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки для публикации материалов докторских диссертаций. Наиболее значимыми, по мнению оппонента, являются следующие.

1. Проведены экспериментальные исследования и установлены основные закономерности процессов массоотдачи на поверхностях каналов с поворотом потока и с дискретным расширением при течении однофазных и двухфазных потоков (получены аппроксимационные выражения для максимальных коэффициентов массоотдачи в каналах за сечением расширения и с поворотом потока, выделены зоны наибольших значений коэффициентов массоотдачи и степеней интенсификации массообмена по сравнению с прямыми каналами).
2. По результатам экспериментальных исследований пленочных течений жидкого азота и спутного потока пара в щелевом миниканале получены распределения толщин пленок по периметру канала при различных режимных параметрах, и установлен диапазон расходов жидкости, в

котором толщины пленок на узкой и широкой стенках канала существенно различаются.

3. Выделены условия, при которых происходит выравнивание толщины пленки жидкости по периметру миниканала прямоугольного сечения, режим течения становится подобным дисперсно-кольцевому режиму течения в круглой трубе.
4. Установлены основные закономерности процессов интенсификации теплообмена при течении пленок на структурированных поверхностях различного типа (достигнута значительная интенсификация теплообмена в режиме пузырькового кипения; показано, что критический тепловой поток близок к величине теплового потока полного испарения; выделены области режимных параметров, соответствующие интенсификации теплообмена на структурированных поверхностях).
5. По результатам экспериментальных исследований процесса разделения бинарных смесей на структурированных насадках с различными углами наклона ребер показано влияние формы поперечного сечения дистилляционной колонны на эффективность разделения.
6. Установлено влияние режимных параметров (отношения расходов жидкости и пара, высоты насадки, угла вращения слоев, удельный поверхности) и способов установки структурированной насадки в разделительную колонну на эффективность разделения и гидравлическое сопротивление.

Практическая значимость.

Результаты диссертационного исследования Н.И. Печеркина имеют большое практическое значение и могут быть использованы при разработке новых технологий и совершенствования современных при создании различного рода теплообменников и систем: при разработке конструкций новых теплообменников с двухфазными потоками и при анализе коррозионно-эрозийного износа каналов в системах циркуляции теплоносителя в

энергетическом и химическом оборудовании; при проектировании установок для сжижения природного газа, дистилляционных установок, тепловых насосов и холодильных машин; при разработке дистилляционных колонн, выпарных аппаратов и теплообменников, использующих пленочные течения жидкостей и двухфазных сред.

Также необходимо отметить, что достаточно уникальные результаты экспериментов, приведенные в рукописи диссертации Н.И. Печеркина, могут использоваться при верификации современных пакетов программ и вновь создаваемых при оценке работоспособности последних при решении задач пленочных течений двухфазных сред, в том числе и на структурированных поверхностях.

Замечания по диссертационной работе.

1. При оформлении и интерпретации основных результатов выполненных экспериментов автор в качестве функции цели использует, как правило, различные варианты представления коэффициентов массоотдачи и теплообмена, а в качестве одного из основных значимых факторов – число Рейнольдса. Но при вводе в рассмотрение этого критерия важную роль играет используемый характерный размер. Характеристики рассматриваемых в первой главе диссертации достаточно сложных течений зависят как от поперечного размера канала, так и от продольной координаты. В тексте этой главы отсутствует описание процедуры выбора характерного размера и обоснование этого выбора.
2. На стр. 93 и 94 рукописи приведены иллюстрации (рис. 2.8, 2.9), на которых показаны изменения профилей волновой поверхности пленки жидкого азота во времени для широкой и узкой стенок. Вид зависимостей $\delta(t)$, которые, скорее всего соответствуют средним (по длине канала) толщинам пленки неочевиден. Но в тексте второй главы отсутствует анализ возможных причин таких зависимостей δ от времени.

3. В третьей главе не указано, как производилась установка сеток на рабочие участки и осуществлялся контроль контакта сеток с обогреваемой поверхностью. При неполном контакте сетки и поверхности жидкость может стекать в зазоре между стенкой и сеткой, искажая как режим течения, так и результаты измерений коэффициентов теплоотдачи.
4. В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния характеристик структурированной насадки и способов ее установки в разделительную колонну на эффективность разделения и гидравлическое сопротивление. Важным параметром, относящимся к установке насадки в колонну, является зазор между стенкой колонны и боковой поверхностью пакетов насадки. Этот зазор может служить байпасом как для жидкости, вытекающей из каналов насадки, направленных к стенке колонны, так и для пара. В работе ничего не говорится о величине этого зазора и о влиянии его на эффективность разделения смеси и на распределение локальных параметров потоков по сечению колонны.

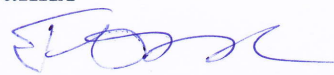
Значимость для науки и практики полученных в диссертации Н.И. Печеркина результатов, положений и выводов сделанные замечания не снижают. Диссертация Н.И. Печеркина является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, содержит результаты экспериментальных исследований, соответствующие критерию новизны.

Диссертация Н.И. Печеркина соответствует специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника. Автореферат диссертации полностью соответствует тексту рукописи, которая написана правильным русским языком, в доказательном стиле и хорошо иллюстрирована. Диссертация хорошо апробирована.

Заключение о соответствии диссертации критериям.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации Н.И. Печеркина «Тепло- и массообмен при течении двухфазных потоков на поверхностях и в каналах сложной формы» можно сделать обоснованное заключение о ее соответствии требованиям П.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018), а ее автор Николай Иванович Печеркин заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,
Главный научный сотрудник
НОЦ И.Н. Бутакова
Инженерной школы энергетики
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
доктор физико-математических наук,
профессор


20.05.2019

Кузнецов Гений Владимирович

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д.30,
ФГАОУ ВО НИ ТПУ
тел.: 8 (3822) 60-63-33,
tpu@tpu.ru; <http://www.tpu.ru/>
E-mail: marisha@tpu.ru
тел.: 8(3822)60-62-48

Я Кузнецов Гений Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Печеркина Николая Ивановича, и их дальнейшую обработку.

Подпись Г.В. Кузнецова удостоверяю

Ученый секретарь Национального
исследовательского Томского
политехнического университета



Ананьева Ольга Афанасьевна