

ОТЗЫВ
на автореферат диссертации Печеркина Николая Ивановича

**Тепло- и массообмен при течении двухфазных потоков
на поверхностях и в каналах сложной формы**

представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность тематики диссертационной работы. Течения двухфазных паро- и газожидкостных потоков широко распространены в традиционной, включая миниканалы компактных теплообменников, и ядерной энергетике, химической технологии, криогенной и низкотемпературной технике, трубопроводном транспорте и других высокотехнологичных отраслях народного хозяйства. При этом используются поверхности и каналы различных геометрических форм, размеров, типов оребрения и пространственной ориентации в широкой области режимных условий течения по давлению, температуре и скорости фаз. Совершенствование их конструкций наряду с обеспечением эффективной и надежной работы на основе использования современных экспериментальных - оптических, электродиффузионных и других локальных методов исследования «тонкой структуры» полей течений и на поверхности раздела фаз, является **актуальной проблемой**, в том числе, для совершенствования эффективности и производительности разделительных колонн.

Достижение поставленных в работе целей реализовывалось решением следующих задач:

1. Экспериментальное исследование влияния режимных параметров на локальное распределение и интенсификацию массоотдачи каналов в указанных областях приложений.
2. Для прямоугольных миниканалов – исследование влияния расходных характеристик на распределение параметров потока по периметру, включая толщину жидкой пленки.
3. Исследование путем фото- и видеосъемки влияния типов структурирования поверхности на: режимы течения, интенсификацию теплообмена и кризис теплоотдачи в стекающих пленках хладонов вплоть до образования сухих пятен и кризиса теплоотдачи.
4. Изучение закономерностей массопереноса на интерфейсе при противоточном движении фаз в каналах структурированных насадок (СН) при разделении в дистилляционной колонне (ДК), а также влияния форм, характеристик СН и способов их установки в ДК на гидравлическое сопротивление и эффективность разделения бинарной смеси.

Научная новизна заключается в получении **новых опытных данных по:**

а) распределению локальных коэффициентов массоотдачи на внутренней поверхности канала с поворотом потока и канала с расширением для 1-го и 2-х фазного течений. При этом, повышенные коэффициенты типичны для внутренней образующей вблизи входа в канал, а на внешней и средней образующих – на выходе из канала. Получены эмпирические зависимости для границы пузырьковый - струйный поток и зоны максимума массоотдачи;

б) по характеристикам волнового пленочного течения жидкого азота при спутном течении пара в узком прямоугольном миниканале, включая профили распределения пленки;

в) по волновым характеристикам, интенсификации теплообмена и кризису в стекающих пленках смесей хладонов на СП различных типов;

г) исследовано влияние режимных параметров, геометрии, расположения, способов установки и условий орошения СН на гидросопротивление и эффективность разделения смеси;

д) по эффективности разделения смеси и перепаду давления на СН с различными углами наклона ребер в колоннах с квадратными и полуцилиндрическими формами сечения, включая колонны с некруглым поперечным сечением.

Научная и практическая значимость. Эти исследования представляют ценность для:

а) совершенствования конструкций каналов сложной формы и при разработке моделей расчета коррозионно-эрозийного износа каналов в энергетике, химии и других областях;

б) при разработке и внедрении в промышленное производство структурированных труб и других поверхностей, предназначенных для интенсификации тепломассообмена при пленочных течениях жидкости, при моделировании и расчете процессов на СП: насадках дистилляционных колонн, в выпарных аппаратах, теплообменниках и других приложениях;

в) данные по эффективности разделения, перепаду давлений, распределениям расходов жидкости и состава смеси на СП следует применять при проектировании современных разделительных колонн, обоснованного выбора конструкций насадок и режимов работы колонн.

Достоверность полученных результатов подтверждена их воспроизводимостью, сравнением с данными других работ, расчетными зависимостями, оценками материальных и тепловых балансов используемого в опытах оборудования, а также оценкой погрешности экспериментов, калибровкой датчиков и применением аттестованных средств измерения.

Положения, выносимые на защиту, содержат результаты экспериментальных исследований, ряд эмпирических зависимостей и их обобщений, актуальных для технических приложений в области тепломассообмена и гидродинамики двухфазных потоков, а именно:

а) распределений локальных коэффициентов массоотдачи и положением зон с их максимумом в каналах сложной формы, а также по условиям перехода от пузырькового к струйному режиму течения в канале с внезапным расширением;

б) характеристики волнового пленочного течения азота при спутном течении пара в узком прямоугольном миниканале, визуализация и измерения распределений пленки азота;

в) влияния параметров структур (микрохарактеристик) обогреваемой поверхности на интенсификацию теплообмена в стекающей пленке смесей хладонов, критических тепловых потоков и обобщения по коэффициентам теплоотдачи в режиме испарения;

г) обработка данных по влиянию режимных параметров способа установки СН в разделительную колонну на эффективность разделения и гидросопротивление в зависимости от: высоты насадки, угла вращения слоев, удельной поверхности;

д) влияния форм поперечного сечения ДК на эффективность разделения бинарной смеси на СН с различными углами наклона ребер: опытные данные по эффективности разделения смеси и перепадам давления на СН в круглой, квадратной и полуцилиндрической колоннах.

Личный вклад автора заключался в:

а) постановке задач исследований лично (и в составе научного коллектива), разработке установок и методик измерения, проведении экспериментов, обработке и анализе данных;

б) основные научные результаты и выводы, выносимые на защиту, получены автором лично. В подготовке совместных публикаций вклад соискателя был определяющим.

Публикации: а) указаны 25 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 патент, 1 монография; б) в целом, результаты диссертации были представлены на 45 конференциях.

Содержание работы

Изложенное в автореферате содержание диссертации отражает требования ВАК и следует представленным выше целям работы.

В 1-й главе дано описание механизма коррозионных повреждений трубопроводов и оборудования, в том числе, для тепловых и атомных электростанций, в основе которого лежит интенсивность массообмена коррозионно-активных примесей в потоке, приведен обзор литературы, указывается, что для двухфазных потоков имеется крайне мало информации.

Далее описаны адиабатические эксперименты с двухфазными потоками на рабочих участках в виде канала с поворотом потока на 90° градусов и вертикального канала с внезапным расширением в условиях восходящего течения. Локальные коэффициенты массоотдачи измерялись электродиффузионным методом датчиками (15 штук) с размером катода 0.3 мм.

Для течений двухфазных потоков в **колоне** приведенные данные демонстрируют сильную пространственную анизотропию распределений относительных коэффициентов массоотдачи по наружной и внутренней поверхности канала, отмеченную выше в разделе научная новизна. Дано объяснение этих эффектов, описан вклад от влияния различных геометрических и режимных параметров, например, величины расходного объемного газосодержания

(β) потока. В частности, наблюдается $3 \div 4^x$ кратное увеличение массоотдачи вблизи входа на внутренней образующей колена в потоке при наименьшей приведенной скорости жидкости равной 0.5 м/с (для скорости жидкости 2.6 м/с это превышение достигает 2^x кратной величины при $\beta=0.6$). Соискатель справедливо отмечает, что именно эти зоны в каналах с поворотом потока подвержены наибольшей коррозии при течении двухфазных потоков.

В каналах с **внезапным расширением** (степень расширения составляла $E=1:2$ и $1:4$) инструментарий и условия проведения экспериментов были такие же, как и в канале с поворотом потока. В канале с расширением $E=1:2$ основной режим течения за уступом был пузырьковый, для больших расширений пузырьковый режим существует при больших скоростях и меньших расходных газосодержаниях. При увеличении газосодержания наблюдается вспененный или эмульсионный режим течения, описаны детали распределений и структуры потока за уступом, приведено полученное им соотношение типа Уоллиса для перехода к струйному течению. Влияние газосодержания на коэффициенты массоотдачи проявляется по-разному в различных зонах канала с расширением... "существенное влияние на распределение газа по сечению оказывают вихревые зоны, протяженность которых и интенсивность движения в них зависят от скорости жидкости". Получена эмпирическая зависимость для максимального коэффициента массоотдачи в каналах с внезапным расширением.

2-я глава посвящена исследованиям опускного двухфазного течения жидкого азота в вертикальном прямоугольном миниканале. Отмечается отсутствие в литературе данных по режимам спутного течения в миниканалах. Описан рабочий участок, фото – и видеосъемка, велись измерения толщин жидкой пленки емкостными датчиками (размером: центральный электрод 0.45 мм, экран 2 мм, обеспечившие погрешность $\approx 5\%$).

Приведены волновые характеристики течения жидкой пленки на узкой и широкой стенках канала. Отмечено значительное ($6^{\text{м}}$ кратное) превышение толщин жидкой пленки на узкой стенке относительно широкой и выравнивание толщин в дисперсно-пленочном режиме.

3-я глава посвящена теплообмену при испарении и кипении в стекающих пленках низкипящей жидкости на структурированных поверхностях: с размерами шероховатости порядка капиллярной постоянной (оребрение $\sin$ -формы, накатка ромбовидной формы), микроструктурными с полужамкнутыми полостями и с внешней шероховатостью в виде сеток. Погрешность определения коэффициентов массоотдачи не превосходила 16%.

Подробно рассмотрено влияние типа СП на режимы течения и на коэффициенты теплоотдачи в сравнении с: а) гладкой поверхностью, б) СП с горизонтальным оребрением, в) СП ромбовидной структуры, г) микроструктура и д) СП типа сетчатого покрытия.

Для СП б) и в) отмечается, что интенсификация теплообмена в режимах испарения наблюдалась только при появлении 3^x -мерных мелкомасштабных волн на поверхности стекающей пленки при более высокой плотности орошения. Приведено обобщение данных по теплоотдаче. Для СП типа б) показано, что при малых числах $Re \leq (70 \div 80)$ теплоотдача ниже, чем теплоотдача на гладкой поверхности из-за накопления жидкости во впадинах. Для СП ромбовидной структуры из-за более равномерного межреберного распределения жидкости теплоотдача выше, чем на гладкой поверхности. В режимах с кипением тонкой пленки обобщение (при отсутствии сухих пятен) обеспечила корреляция Гогонина (2010).

Для СП г) – микроструктура методом деформирующего резания, создает подповерхностные полости, чередующиеся с открытыми полостями, что приводит к увеличению коэффициентов теплоотдачи более чем в три раза по сравнению с гладкой поверхностью.

Для СП д) – в виде проволочных сеток в режиме испарения коэффициенты теплоотдачи возрастают с увеличением размера ячеек сетки, что обусловлено увеличением удельной поверхности с малой толщиной пленки внутри ячейки.

Получены также опытные данные по критическому тепловому потоку (КТП) в стекающих пленках, обусловленные возникновением устойчивых сухих пятен в режимах испарения волновой пленки жидкости с подтверждением применимости корреляции Павленко, Лель (1997), а также для СП с горизонтальным оребрением. Результаты опытов для СП сетчатого

типа из-за увеличения количества удерживаемой жидкости привели к росту КТП. Максимальные КТП получены для СП с подповерхностными впадинами при полном испарении.

4-я глава посвящена тепломассообмену при противоточных течениях жидкости и пара в каналах, оборудованных структурированными насадками (СН) в ректификационной колонне. Важнейшим параметром из-за высокой энергоемкости этих процессов является эффективность разделения, которая неоднозначным образом зависит от расходов жидкости и пара, высоты СН и способов их установки в колонну.

Изменение углов вращения слоев влияло на распределение потоков по сечению колонны и на эффективность разделения, в том числе с неравномерным орошением. Тогда как, перепад давления не зависел от: высоты насадки, угла вращения слоев и неравномерности орошения. Отмечена взаимосвязь локального расхода жидкости и эффективности разделения.

Исследован также перспективный тип колонн – с разделительными стенками.

Итоги рецензирования материала автореферата.

Как видно из отзыва, работа Николая Ивановича Печеркина представляет собой академическое по постановке, высокопрофессионально реализованное с использованием современных средств измерения, собрание экспериментов, нацеленных на совершенствование тепломассообменного оборудования в областях традиционной и ядерной энергетики, низкотемпературной техники и химической технологии для условий двухфазных течений и сложной геометрии каналов. Полученные экспериментальные данные с фиксацией тонкой структуры распределений теплогидравлических параметров и межфазных эффектов представляют большую ценность для валидации и верификации моделей тепло- и массообмена, необходимых для проектирования перспективных конструкций и обоснования их безопасной работы.

К недостаткам изложения материала автореферата можно отнести следующие замечания:

1) несколько снижает впечатление о высоком качестве работы отсутствие в конце каждой из глав автореферата заключений, суммирующих и обобщающих и полученные данные.

В автореферате отсутствует информация о том:

2) проводились ли автором, необходимые для совершенствования корреляций коэффициентов тепло- и массообмена, а также критической плотности теплового потока, аналитические оценки влияния параметров микроструктур обогреваемой поверхности и какие рекомендации получены; в частности,

3) не представлена корреляция для поправки критической плотности теплового потока, «учитывающая увеличение толщины остаточного слоя жидкости» – на рис. 22 линия III;

4) не приведено объяснение физического эффекта – заметного влияния подповерхностных полостей на величину критического теплового потока, см. стр. 26 автореферата.

Заключение

В целом, указанные недостатки не снижают научной и методической ценности выполненной соискателем работы, полученные результаты являются новыми научными знаниями в области тепломассообмена и гидродинамики двухфазных потоков в каналах сложной формы. Проведенные исследования представляют комплекс законченных НИР, имеющих большое практическое значение для названных областей народного хозяйства, выполненных самостоятельно на высоком научном уровне, а их автор Печеркин Николай Иванович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук

по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Главный специалист Теплофизического отделения

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», д.т.н.

Е-мэйл: kornienko_un@grpress.podolsk.ru, сот.: 8-910-593-4318

Подпись Ю.Н. Корниенко заверяю

Начальник отдела кадров АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

Ю.Н. Корниенко

Е.Б. Яркина

д.т.н. Корниенко Юрий Николаевич, Главный специалист АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

142103, Московская обл., г. Подольск, ул. Орджоникидзе д. 21. Е-mail: grpress@grpress.podolsk.ru