



Печеркин Николай Иванович

**ТЕПЛО – И МАССООБМЕН
ПРИ ТЕЧЕНИИ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ
НА ПОВЕРХНОСТЯХ И В КАНАЛАХ
СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Официальные оппоненты:

Зейгарник Юрий Альбертович, д.т.н., ФГБУН Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), главный научный сотрудник Отдела проблем теплоэнергетики, г. Москва.

Кузнецов Гений Владимирович, д.ф.-м.н., профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», главный научный сотрудник НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, г. Томск.

Попов Игорь Александрович, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева КАИ» (КНИТУ-КАИ), профессор кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», г. Казань.

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» г. Москва

Защита состоится 17 апреля 2019 г. в 9 ч 30 мин на заседании диссертационного совета Д 003.053.01 при ФГБУН Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН <http://www.itp.nsc.ru/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 003.053.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1 (факс: (383) 330-84-80, e-mail: dissovet@itp.nsc.ru)

Автореферат разослан _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор

Кузнецов Владимир Васильевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В работе представлены результаты комплексного экспериментального исследования 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, химической технологии. 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.

Течение двухфазного потока с различным паросодержанием в каналах, изменяющих направление движения и величину поперечного сечения, встречается 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. Обеспечение безопасной и надежной работы теплообменного оборудования, запорной арматуры, трубопроводов, работающих в напряженных условиях, определяет актуальность и необходимость изучения процессов тепломассопереноса в каналах сложной формы при течении двухфазных потоков.

Прямоугольные миниканалы являются элементами компактных пластинчатых теплообменников, которые широко используются для обеспечения требуемых тепловых режимов оборудования в энергетике, микроэлектронике, криогенике, авиационной и космической технике, химической технологии и многих других приложениях. Режимы течения двухфазного потока в теплообменниках, предназначенных для ожижения природного газа, характеризуются широким диапазоном изменения паросодержания по длине аппаратов, практически от 0 до 1. Моделирование течения таких сред с помощью криогенных жидкостей позволяет получить максимально близкие закономерности течения и теплообмена, необходимые при проектировании теплообменников для 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. Вследствие малого термического сопротивления и большой межфазной поверхности стекающие пленки оказываются эффективными в процессах межфазного тепломассообмена, где не требуются большие температурные напоры и перепады давления. Для интенсификации теплообмена в стекающих пленках как в режиме испарения, так и пузырькового кипения в промышленности используют так называемые

развитые поверхности (различные типы оребрения, шипы, нанесение пористых покрытий, установку сеток с характерными размерами, сравнимыми с толщинами пленок и длинами волн). Исследование теплообмена в стекающих пленках чистых веществ и их смесей, поиск наиболее эффективных структурированных поверхностей, способствующих повышению коэффициентов теплоотдачи и предельных тепловых потоков для обеспечения устойчивой работы тепломассообменных аппаратов, является актуальной теплофизической задачей.

Дистилляция и ректификация являются чрезвычайно энергоемкими процессами, поэтому эффективность разделения — один из главных параметров, определяющих эксплуатационные расходы, капитальные затраты и габариты данного оборудования. Противоточное течение пара и жидкости в сложных канальных системах структурированных насадок дистилляционной колонны является основным режимом для обеспечения переноса веществ на границе раздела. Основными конструктивными параметрами, определяющими закономерности массопереноса в разделительных колоннах, являются характерные размеры и формы каналов насадок и структуры их поверхности, а также размеры и форма пакетов насадок. Данные, полученные на лабораторных установках, как правило, не воспроизводятся в промышленных установках. Поэтому принципиально важным для решения этих задач является проведение исследований гидродинамики и тепломассообмена при противоточном течении пара и жидкости на крупномасштабных установках.

Исследование явлений переноса на межфазной границе, увеличение производительности колонн и эффективности разделения, разработка более эффективного оборудования для процессов разделения, повышение экономичности разделительных установок являются актуальными задачами как для академических исследований, так и передовых исследовательских групп, связанных с ведущими производителями дистилляционных разделительных установок.

Целью данной работы являлось 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, химической технологии. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Экспериментальное исследование влияния газосодержания и других режимных параметров двухфазного потока на распределение локальных коэффициентов массоотдачи на внутренней поверхности канала с поворотом потока и канала с внезапным расширением с целью определения положения зон на внутренней поверхности каналов, наиболее подверженных воздействию двухфазного потока; определение степени интенсификации массообмена в каналах сложной геометрии в сравнении с прямыми трубами.

2. Исследование влияния расходных характеристик стекающей пленки жидкого азота и спутного потока пара на распределение жидкости по периметру прямоугольного миниканала; измерение толщины пленки на широкой и на узкой стенках канала, визуализация течения.
3. Экспериментальное исследование влияния различных типов структурированных поверхностей, включая сетчатые покрытия и микроструктурированные поверхности с полужамкнутыми порами, на режимы течения, интенсификацию теплообмена, кризис теплоотдачи в стекающих пленках смесей хладонов по вертикальным цилиндрам. Визуализация течения, фото – и видеосъемка поверхности стекающей пленки при различных различных режимах течения — от испарения до образования сухих пятен и развития кризиса теплоотдачи. Сопоставление данных, полученных на структурированных поверхностях различного типа, с результатами для гладкой поверхности.
4. Экспериментальное исследование закономерностей массопереноса на границе раздела фаз при противоточном течении пара и жидкости в каналах структурированных насадок в режиме разделения бинарной смеси в дистилляционной колонне. Исследование влияния характеристик структурированных насадок и различных способов их установки в дистилляционные колонны с различной формой поперечного сечения (круглой, полуцилиндрической, квадратной) на гидравлическое сопротивление и эффективность разделения бинарной смеси в широком диапазоне изменения нагрузки колонны по паровой и жидкой фазам.

Научная новизна. 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. Установлено, что в канале с поворотом потока зоны с повышенными коэффициентами массоотдачи находятся на внутренней образующей вблизи входа в канал, а на внешней и на средней образующих — на выходе из канала. В канале с внезапным расширением проведена визуализация течения двухфазного потока. Исследовано влияние расходных характеристик газовой и жидкой фаз на переход от пузырькового режима к струйному течению за сечением расширения, получена эмпирическая зависимость для условий перехода. Показано, что зона максимума коэффициентов массоотдачи находится в области присоединения потока на расстоянии двух-трех диаметров от сечения расширения. 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 тол-

щины 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. Исследовано влияние характеристик сетчатых покрытий на интенсификацию теплообмена в стекающей пленке смеси фреонов. Показаны области режимных параметров для исследованных структур, в которых имеет место интенсификация теплообмена по сравнению с гладкой поверхностью. Впервые получены опытные данные по теплоотдаче и критическому тепловому потоку в стекающей пленке смеси хладонов на микроструктурированной поверхности с подповерхностными полостями, полученной методом деформирующего резания.

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. При увеличении высоты упаковки структурированной насадки происходит увеличение высоты единицы переноса и высоты, эквивалентной теоретической тарелке. Обнаружено, что с увеличением отношения расходов жидкости и пара происходит уменьшение указанных величин. Уменьшение угла вращения слоёв насадки при неравномерном орошении приводит к значительному ухудшению разделения смеси. Относительный перепад давления практически не зависит от высоты насадки, угла вращения слоев и условий орошения насадки в исследованном диапазоне изменения расходов пара и жидкости.

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. Показано, что на насадке с углом наклона ребер 45° в полуцилиндрической и квадратной колоннах происходит существенное уменьшение эффективности разделения смеси по сравнению с круглой колонной, а для насадки с низким гидравлическим сопротивлением (угол наклона ребер 60°) эффективность разделения в квадратной и круглой колоннах практически одинакова. 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.

Научная и 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, дистиляционных 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 дистиляционных 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.

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.

Положения, выносимые на защиту:

Результаты экспериментального исследования влияния газосодержания на распределение локальных коэффициентов массоотдачи на внутренней поверхности канала с поворотом потока и канала с внезапным расширением и положение зон с максимальными коэффициентами массоотдачи. Результаты обобщения данных и эмпирические зависимости для максимальных коэффициентов массоотдачи в каналах сложной формы. Результаты по условиям перехода от пузырькового режима течения к струйному режиму в канале с внезапным расширением.

Результаты экспериментального исследования характеристик волнового пленочного течения жидкого азота при спутном течении пара в узком прямо-

угольном миниканале. Результаты визуализации и измерения распределения толщины пленки жидкого азота по периметру прямоугольного миниканала при различных расходах жидкости и пара.

Результаты исследования влияния параметров различных структур обогреваемой поверхности, включая поверхности с сетчатыми покрытиями и поверхность с микроструктурой, на интенсификацию теплообмена в стекающей пленке смесей хладонов (результаты измерения критических тепловых потоков, измерения и обобщения данных по коэффициентам теплоотдачи в режиме испарения и пузырькового кипения).

Результаты экспериментального исследования и обработки данных по влиянию режимных параметров и способов установки структурированной насадки в разделительную колонну на эффективность разделения и гидравлическое сопротивление: опытные данные по влиянию отношения расходов жидкости и пара, высоты насадки, угла вращения слоёв, удельной поверхности на перепад давления, высоту единицы переноса и высоту, эквивалентную теоретической тарелке.

Результаты экспериментального исследования влияния формы поперечного сечения дистилляционной колонны на эффективность разделения бинарной смеси на структурированной насадке с различными углами наклона ребер: опытные данные по эффективности разделения смеси и перепаду давления на структурированной насадке в круглой, квадратной и полуцилиндрической колоннах. Обобщение данных и сравнение результатов проведенных экспериментов с расчетными моделями.

Личный вклад автора. Постановка задач исследований проводилась автором как лично, так и совместно с Павленко А.Н., Чеховичем В.Ю. Автор в составе научного коллектива участвовал в создании всех экспериментальных установок, разработке методик измерения, проведении экспериментов. Непосредственно руководил разработкой и созданием двух экспериментальных установок и соответствующих методик измерений (установка по исследованию массообмена в каналах с поворотом потока и внезапным расширением и установка по исследованию теплообмена в стекающих пленках). Основные научные результаты и выводы, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично. Обработка и анализ данных, представленных в диссертации, проведены автором самостоятельно. В подготовке совместных публикаций по результатам исследований вклад диссертанта был определяющим.

Апробация результатов. Результаты работы были представлены на 30 отечественных и 15 международных конференциях и семинарах: на Минском международном форуме «Тепломассообмен–ММФ» (Минск, 1988); конференции «Методы и средства измерения теплофизических параметров – Теплофизика–96» (Обнинск, 1996); Third Int. Conf. on Multiphase Flow ICMF-98, (Lyon, France, 1998); 2nd Int. Symp. on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, (Pisa, Italy, 1999); Third Int. Conf. on Transport Phenomena in Multiphase Systems «Heat-2002» (Baranov Sandomierski, Poland, 2002); на 1-ой научной школе-

конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», (Алушта, Украина, 2003); Int. Congr. of Chemical and Process Engineering «CHISA», (Prague, Czech Republic, 2008, 2014); Fourth Int. Topical Team Workshop on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications, (Novosibirsk, Russia, 2009); The 7th Int. Conf. on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics «HEFAT 2010» (Antalya, Turkey, 2010); Всероссийской молодежной конференции «Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей» (Новосибирск, 2010); Всероссийской научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2010); XI Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2010); XVIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов (Звенигород, 2011); VIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика Алемасова В.Е. «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в машиностроении» (Казань, 2012 г); XIX Школе-семинаре молодых ученых и специалистов (Орехово-Зуево, 2013); The 6th Int. Conf. on Fluid Mechanics «ICFM-6» (Guangzhou, China, 2011); The 7th Int. Conf. on Diffusion in Solids and Liquids «DSL-7» (Algarve, Portugal, 2011); The Int. Workshop on Heat Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control «IWHT» (China, 2013, Taiwan, 2015); 10th Int. Conf. on «Distillation & Absorption» (Friedrichshafen, Germany, 2014); Международных семинарах «Topical issues of heat and mass transfer at phase transitions and multiphase flows in modern chemical technology and energy equipment» ISHM (Новосибирск, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018); Всероссийской научной конф. «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта 2016); Междунар. научном конгрессе «Интерэкспо Гео-Сибирь», Новосибирск (2007, 2008, 2016–2018); 1-st Thermal and Fluid Engineering Summer Conf. (TFESC-15), New York City, USA, 2015; Сибирском теплофизическом семинаре «СТС» (Новосибирск, 2005, 2010, 2014, 2015, 2017, 2018); Российской национальной конференции по теплообмену «РНКТ» (Москва, 1998, 2002, 2010, 2014, 2018). Результаты, приведенные в диссертации, включались в перечень важнейших достижений ИТ СО РАН (2008, 2012, 2018).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 76 печатных работах, из них 25 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 патент, 1 монография.

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

Содержание работы

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 90° и с внезапным расширением.

В п. 1.1 описан механизм коррозионных повреждений трубопроводов и других элементов оборудования на тепловых и атомных электростанциях. 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.

В п. 1.2 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. Данные по массообмену на стенках каналов сложной формы получены в основном для однофазного потока. Данные по массопереносу в двухфазных потоках в каналах сложной формы немногочисленны, получены, как правило, с помощью непрямых методов измерения, носят случайный характер. На основе анализа литературы сформулированы задачи исследования.

В п. 1.3 приведено описание экспериментальной установки и метода измерения локальных коэффициентов массоотдачи. Экспериментальная установка для исследования тепло- и массообмена и гидродинамики в двухфазных потоках представляет собой замкнутый циркуляционный контур. Двухфазный

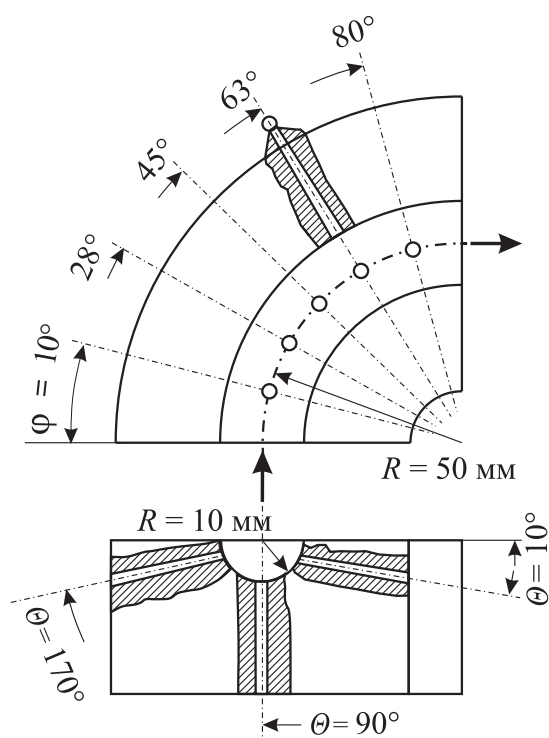


Рис. 1. Схема рабочего участка с поворотом потока на 90° .

поток создавался смешением жидкости с потоком воздуха. Эксперименты проводились при атмосферном давлении при температуре потока 25°C ($Sc = 1420$) и 50°C ($Sc = 480$). Приведенные скорости жидкости изменялись от 0.5 до 2.6 м/с (числа Рейнольдса — от 9×10^3 до 8×10^4). Объемное расходное газосодержание β изменялось от 0 до 0.6. Локальные коэффициенты массоотдачи на внутренней поверхности канала с поворотом потока и канала с внезапным расширением измерялись электродиффузионным методом (Накоряков и др. 1973, 1986; Shaw and Hanratty 1977; Кадер и др. 1980). Для измерения локальных коэффициентов массоотдачи использовались датчики с размером катода 0.3 мм. Свойства электролита, используемого в установке в качестве рабочей жидкости, незначительно отличаются от свойств воды. Погрешности изме-

рения основных величин: приведенной скорости жидкости – 1.7%, приведенной скорости газа – 4.1%, объемного расходного газосодержания – 4.4%, коэффициентов массоотдачи – 6.8%.

В п. 1.4 приведены результаты исследования массообмена на внутренней поверхности канала с поворотом потока. Схема рабочего участка приведена на рис. 1. Внутренний диаметр канала 20 мм, относительный радиусгиба $\tilde{R} = 5$. Для измерения локальных коэффициентов массоотдачи на внутренней, на средней и на внешней образующих рабочего участка установлено 15 датчиков. Один датчик установлен в подводящей трубе для получения базовых значений коэффициентов массоотдачи в прямой трубе в аналогичных условиях.

При течении однофазной жидкости на внутренней образующей колена при увеличении угла поворота наблюдается уменьшение коэффициентов массоотдачи по сравнению с прямой трубой, особенно при малых расходах жидкости. На средней образующей локальные коэффициенты массоотдачи плавно возрастают от входа к выходу из канала. На средней образующей на выходе из колена для всех расходов жидкости наблюдаются наибольшие коэффициенты массоотдачи. Течение в зоне средней образующей определяется суперпозицией основного течения и вторичного поперечного течения, что приводит к увеличению локальных коэффициентов массоотдачи в этой области. На выходе из канала интенсификация массопереноса достигает 60%. На внешней образующей при малых приведенных скоростях жидкости на входе в канал коэффициенты массоотдачи остаются такими же, как и в прямой трубе. На выходе из канала интенсификация массообмена по сравнению с прямой трубой достигает 30%.

Добавление газа в поток жидкости существенно изменяет распределение локальных коэффициен-

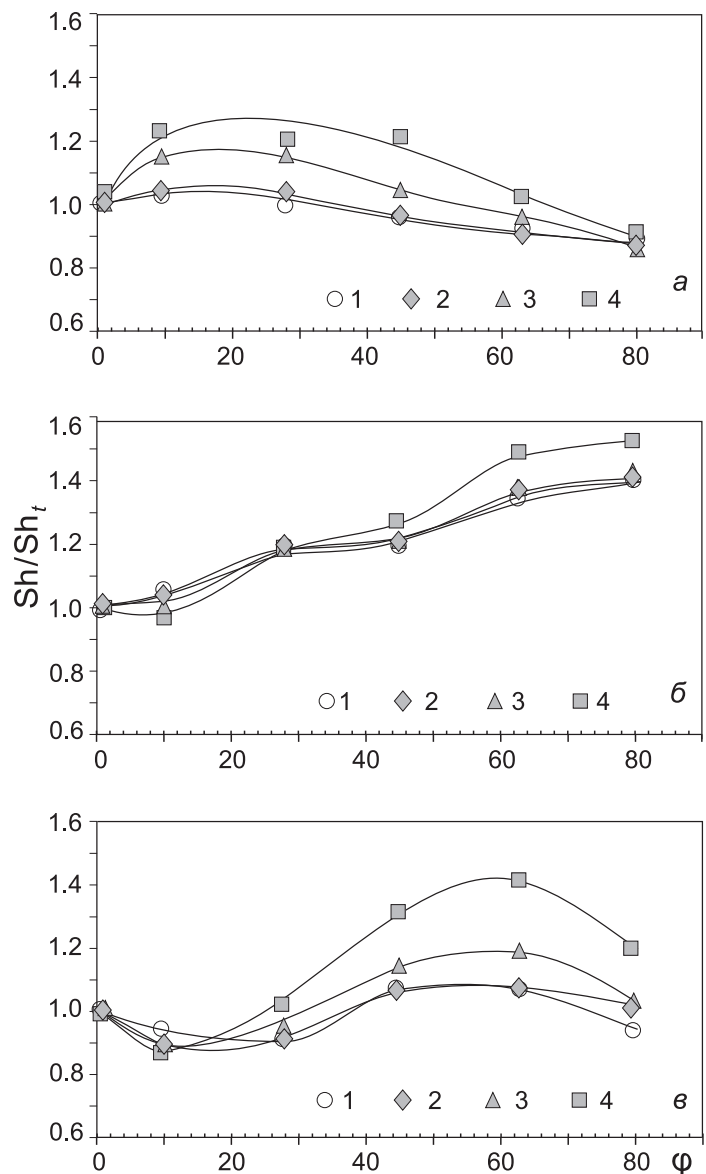


Рис. 2. Влияние угла поворота на относительные коэффициенты массоотдачи в канале с поворотом потока. $U_{L0} = 2.6$ м/с; а — внутренняя образующая; б — средняя образующая; в — внешняя образующая. β : 1 — 0; 2 — 0.1; 3 — 0.3; 4 — 0.5.

ентов массоотдачи на внутренней поверхности изогнутого канала. На рис. 2 показаны локальные коэффициенты массоотдачи для различных газосодержаний двухфазного потока, отнесенные к соответствующим величинам в подводящей трубе. Коэффициенты массоотдачи на внутренней образующей вблизи входа в канал в двухфазном потоке резко возрастают, а на внешней образующей уменьшаются относительно подводящей прямой трубы. На внутренней образующей на входе в канал увеличение коэффициентов массоотдачи по сравнению с прямой трубой при малых расходах жидкости достигает 40%, при больших расходах жидкости — 20%. На средней образующей относительные коэффициенты массоотдачи плавно увеличиваются с увеличением угла поворота. Основные закономерности изменения коэффициентов массоотдачи в газожидкостном потоке сохраняются такими же, как в однофазном потоке. Интенсификация массопереноса достигает 60% на выходе из канала. На внешней образующей коэффициенты массоотдачи на входе в канал резко уменьшаются, проходят через минимум при углах поворота 10° – 30° , затем плавно увеличиваются к выходу из канала. При больших приведенных скоростях жидкости коэффициенты массоотдачи возрастают с увеличением газосодержания, достигая максимальных значений на углах поворота 50° – 70° . Интенсификация массообмена по сравнению с прямой трубой при малых расходах жидкости составляет 10–20%, при больших расходах жидкости — 40–50%.

На рис. 3 показано влияние газосодержания на распределение локальных коэффициентов массоотдачи в колене. Данные представлены в виде отношения коэффициентов массоотдачи в двухфазном потоке к коэффициентам массоотдачи в однофазном потоке для одних и тех же углов поворота. На внутренней образующей на входе в канал интенсификация массообмена по сравнению с однофазным потоком достигает наибольшей величины для приведенной скорости

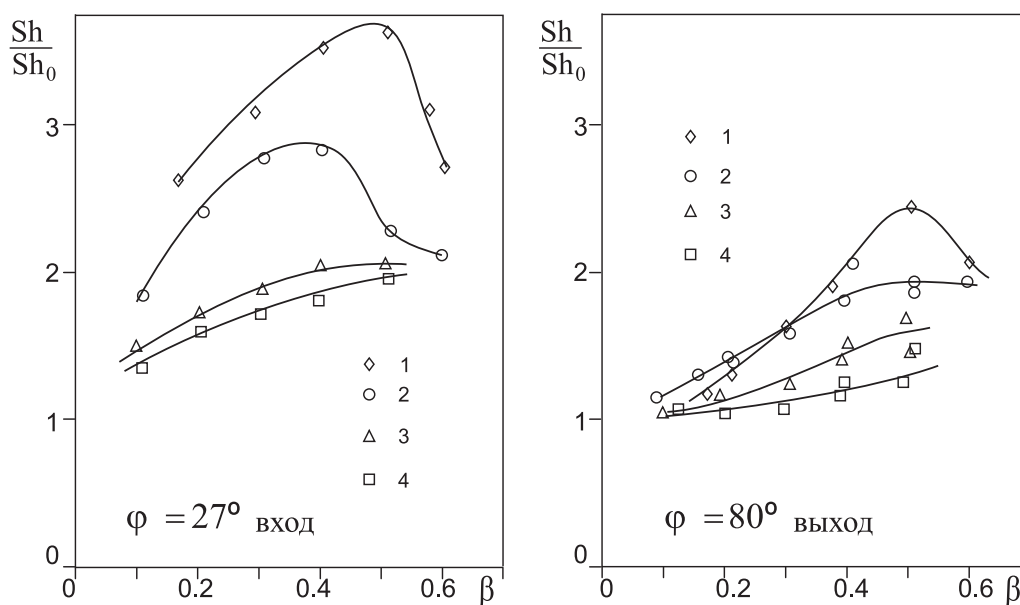


Рис. 3. Влияние газосодержания на относительные коэффициенты массоотдачи на внутренней образующей колена. U_{L0} , м/с: 1 — 0.5; 2 — 1; 3 — 2; 4 — 2.6.

жидкости 0.5 м/с. Здесь наблюдается $3^x - 4^x$ -кратное увеличение локальных коэффициентов массоотдачи. Вид зависимости локальных коэффициентов массоотдачи от объемного расходного газосодержания такой же, как и в прямых трубах. Аномальное повышение коэффициентов переноса в прямых трубах обусловлено профилем распределения газосодержания по радиусу трубы. В канале с поворотом потока концентрация пузырьков газа вблизи стенки на внутренней образующей повышается под действием центробежных сил (Тарасевич и др. 2012), что может приводить к повышению коэффициентов массоотдачи в этих условиях. При течении газожидкостного потока с приведенной скоростью жидкости 2.6 м/с как на входе, так и на выходе из канала наблюдается монотонное увеличение относительных коэффициентов массоотдачи с увеличением газосодержания, при этом интенсификация достигает 60–80%. На средней и внешней образующих относительные коэффициенты массоотдачи зависят только от величины газосодержания и практически не зависят от приведенной скорости жидкости и угла поворота.

В двухфазном потоке участки поверхности с наибольшими коэффициентами массоотдачи расположены на внутренней образующей в зоне $10^\circ - 45^\circ$ и на выходе из канала на средней и на внешней образующих. Эти зоны внутренней поверхности каналов с поворотом потока могут быть подвержены наибольшей коррозии при течении двухфазного потока.

В п. 1.5 приведены результаты исследования массообмена на внутренней поверхности канала с внезапным расширением. Канал с внезапным расширением изготовлен из оргстекла. Внутренний диаметр канала большего сечения $d_2 = 42$ мм, длина $L = 300$ мм, каналы меньшего диаметра имеют размеры $d_1 = 10$ и 20 мм, рис. 4. Степень расширения каналов по отношению диаметров составила $E = 1:2$ и $1:4$, относительная длина канала $L/d_2 = 7.1$. Канал расположен вертикально, движение потока осуществляется снизу вверх. В канале установлены 15 датчиков для измерения локальных коэффициентов массоотдачи на внутренней поверхности. Условия проведения экспериментов такие же, как и в канале с поворотом потока.

В канале с расширением $E=1:2$ основной режим течения за уступом — пузырьковый (рис. 5). При увеличении степени расширения пузырьковый режим существует при больших скоростях жидкости и малых расходах газа. При увеличении газосодержания наблюдается вспененный или эмульсионный режим течения. Зона вблизи се-

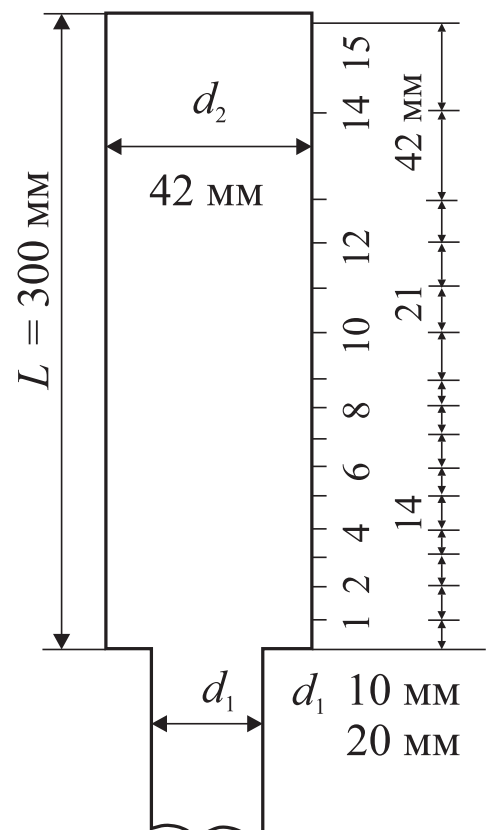


Рис. 4. Схема рабочего участка с внезапным расширением.

чения расширения свободна от пузырьков газа, причем эта зона значительно больше для степени расширения $E=1:4$. Движение жидкости здесь закрученное, направление закрутки периодически меняется. В зоне от одного до 3^x-4^x диаметров трубы вблизи стенки наблюдаются вихревые или опускные течения, и лишь на выходе из канала начинает формироваться поток, направленный вверх. Размер пузырьков зависит от степени расширения канала. При плавном увеличении расходов газа или жидкости происходит отрыв потока от стенок канала (рис. 5). Двухфазный поток истекает из трубы меньшего диаметра в виде двухфазной струи. Чем меньше расход жидкости, тем при большем расходе газа происходит переход к струйному течению, и наоборот. Используя подход Уоллиса (1972), было получено соотношение, описывающее переход к струйному течению:

$$U_G^{*1/2} + U_L^{*1/2} = 1.3, \quad (1)$$

где U^* — модифицированные приведенные скорости газа и жидкости.

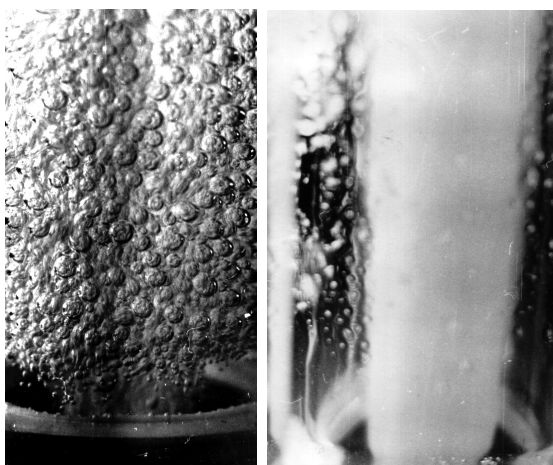


Рис. 5. Пузырьковый (слева) и струйный (справа) режимы истечения двухфазного потока из канала с внезапным расширением.

Распределение безразмерных коэффициентов массоотдачи по длине каналов с различной степенью расширения показано на рис. 6. В однофазном потоке ($\beta = 0$) имеется, как правило, два локальных максимума коэффициента массоотдачи. Основной максимум расположен на расстоянии $x/d_2 \approx 2.3$ от сечения расширения. Относительные коэффициенты массоотдачи в зоне максимума растут с увеличением высоты уступа. На выходе из канала относительные коэффициенты массоотдачи приближаются к единице. Расход жидкости слабо влияет на изменение интенсивности массопереноса по длине канала.

Распределение локальных коэффициентов массоотдачи по длине канала для двухфазного потока зависит как от скорости жидкости, так и от расходного газосодержания β . В целом изменение коэффициентов массоотдачи по длине аналогично однофазному потоку (рис. 6). Для канала с расширением 1:2 при малых расходах жидкости имеют место два локальных максимума на расстояниях примерно одного и двух диаметров канала (рис. 6 слева). Во второй половине канала коэффициенты массоотдачи практически не изменяются по длине. С увеличением расхода жидкости локальный максимум смещается к точке $x/d_2 = 2.3$. На расстояниях до $x/d_2 = 1$ влияние газосодержания уменьшается и при больших расходах жидкости практически исчезает. Визуальные наблюдения показывают, что в этих режимах в углах канала вблизи

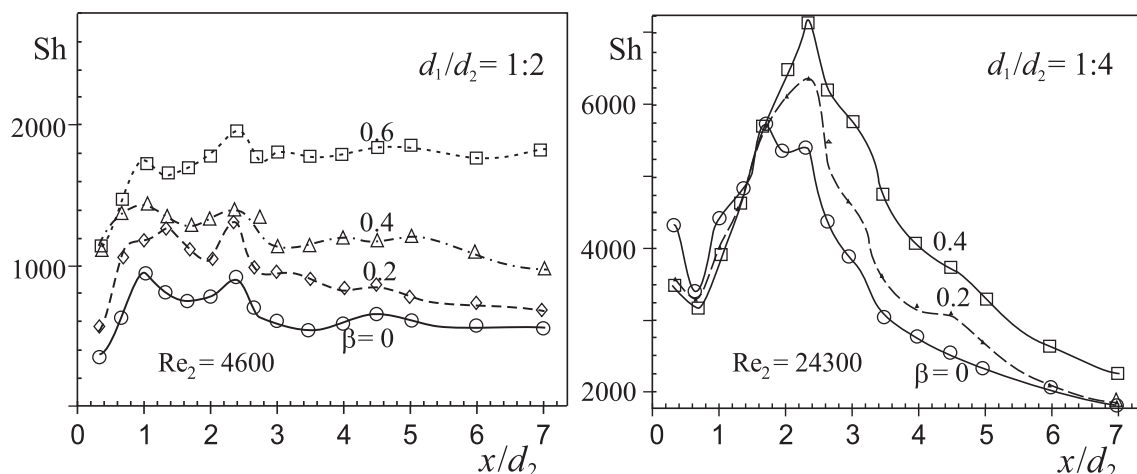


Рис. 6. Влияние газосодержания на распределение локальных коэффициентов массоотдачи по длине канала с внезапным расширением.

сечения расширения отсутствуют пузырьки газа. При больших расходах жидкости появляется локальный максимум на расстоянии $x/d_2 = 5$, что, вероятно, обусловлено возникновением вихрей другого масштаба. Визуальные наблюдения показывают, что течение в этой зоне носит хаотичный характер без четко выраженного направления движения.

Для канала со степенью расширения $E = 1:4$ вблизи входа в трубу коэффициенты массоотдачи практически не отличаются от однофазного течения, а при больших расходах жидкости в этой зоне появляется локальный минимум (рис. 6 справа). Значение коэффициентов массоотдачи в зоне максимума значительно выше, чем в канале с расширением 1:2. Положение максимумов массоотдачи слабо зависит от величины газосодержания. После достижения максимума коэффициенты массоотдачи резко падают и на выходе из канала приближаются к тем же значениям, что и в канале с расширением 1:2.

Влияние газосодержания на относительные коэффициенты массоотдачи проявляется по разному в различных зонах канала с расширением. В области максимума массоотдачи при $x/d_2 = 2.3$ влияние расхода жидкости на относительные коэффициенты массоотдачи практически отсутствует (рис. 7). Существенное возрастание относительных коэффициентов массоотдачи наблюдается только в канале с расширением 1:2 при больших газосодержаниях. Сравнение данных по максимальным коэффициентам массоотдачи с данными работы Chouikhi et al. (1987), полученными в близких по размерам каналах, показывает удовлетворительное их совпадение.

Приведенные на рис. 6 и 7 данные показывают, что относительные коэффициенты массоотдачи зависят не только от величины газосодержания, но в значительной степени и от приведенной скорости жидкости. По аналогии с течением газожидкостной смеси в трубах такая зависимость объясняется характером распределения газосодержания по сечению трубы. В случае течения в канале с внезапным расширением существенное влияние на распределение газа по сечению оказывают вихревые зоны, протяженность которых и интен-

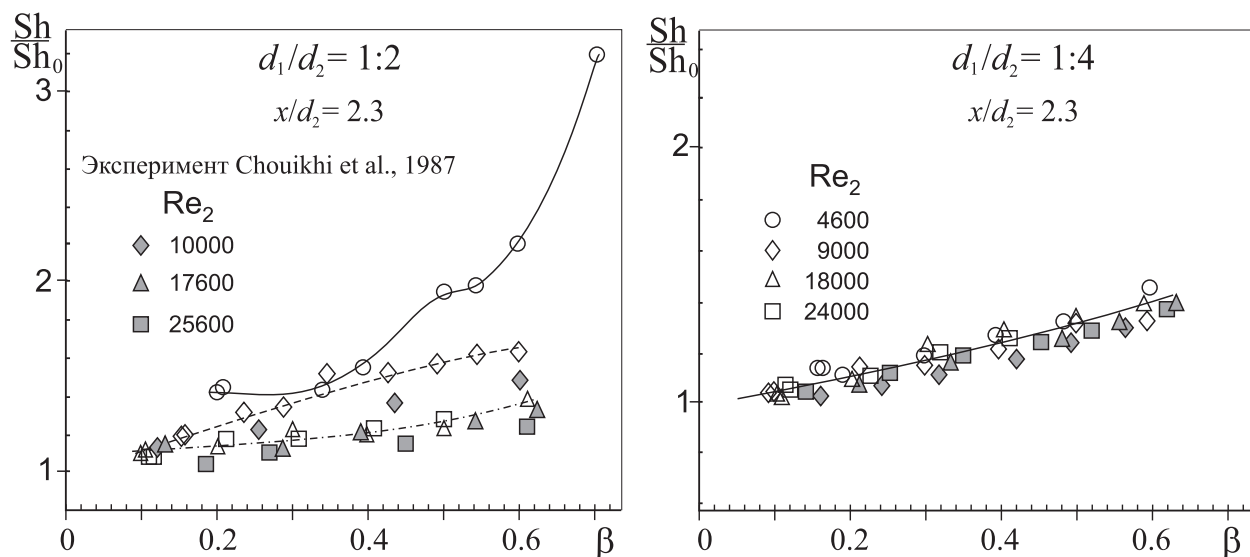


Рис. 7. Влияние газосодержания на относительные коэффициенты массоотдачи в зоне присоединения потока. (Обозначения относятся к обоим частям рисунка).

сивность движения в них зависят от скорости жидкости. Влияние газосодержания потока проявляется по-разному в разных зонах канала с расширением. В зоне рециркуляции вблизи сечения расширения при больших расходах жидкости влияние газосодержания отсутствует, т. к. эта зона почти свободна от пузырьков газа. С точки зрения интенсификации процесса массоотдачи наиболее опасной является зона, расположенная на расстоянии от 2-х до 4-х диаметров канала за сечением расширения.

Полученные данные по максимальным коэффициентам массоотдачи в канале с внезапным расширением удовлетворительно обобщаются эмпирической зависимостью:

$$Sh_{\text{макс}} = 0.252 Re_{L1}'^{0.7} Sc^{1/4}. \quad (2)$$

В число Рейнольдса входит истинная скорость жидкой фазы в трубе, из которой происходит истечение двухфазного потока.

В Приложении к главе 1 диссертации показано, что в каналах сложной формы могут быть использованы методы и подходы, основанные на аналогии тепло – и массообмена в однофазных и в двухфазных потоках.

Во второй главе приведены результаты исследования опускного течения жидкого азота с потоком пара в вертикальном прямоугольном миниканале.

В п. 2.1 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.

В п. 2.2 приведено описание экспериментальной установки, рабочего участка и методики исследования режимов течения жидкого азота и спутного потока пара в вертикальном прямоугольном мини-канале. Исследования проводились в оптическом криостате. Жидкий азот подводился к рабочему участку (рис. 8) из сосуда Дьюара через бак постоянного напора. Для обеспечения равномерного орошения стенок канала жидкость подавалась через пористую вставку (3). Газообразный азот из баллона высокого давления через расходомер и теплообменник поступал в верхнюю камеру рабочего участка (5). Размеры канала 2.6×7.1 мм, общая длина канала 250 мм. Стенки рабочего участка изготовлены из оргстекла. Для исследования режимов течения проводились фото — и видеосъемка, измерения локальной толщины пленки на широкой и узкой стенках канала. Для измерения толщины пленки на стенках канала применялся емкостной метод измерения, адаптированный для работы в криогенных жидкостях (Кротов и др., 1997; Назаров, дисс. 2013). Емкостные датчики (7) с размером центрального электрода 0.45 мм, экрана — 2 мм, установлены на расстоянии 200 мм от входа. Погрешность измерения толщины пленки в диапазоне до 500 мкм, определенная по результатам статической калибровки, была не более $\approx 5\%$. Эксперименты проведены при атмосферном давлении. Диапазон изменения чисел Рейнольдса: для жидкой фазы — от 200 до 2000, для паровой фазы — от 0 до 20 000.

В п. 2.3 приведены результаты исследования режимов опускного течения жидкого азота в прямоугольном мини-канале. При малых расходах жидкость на широкой стороне канала (рис. 9) течет

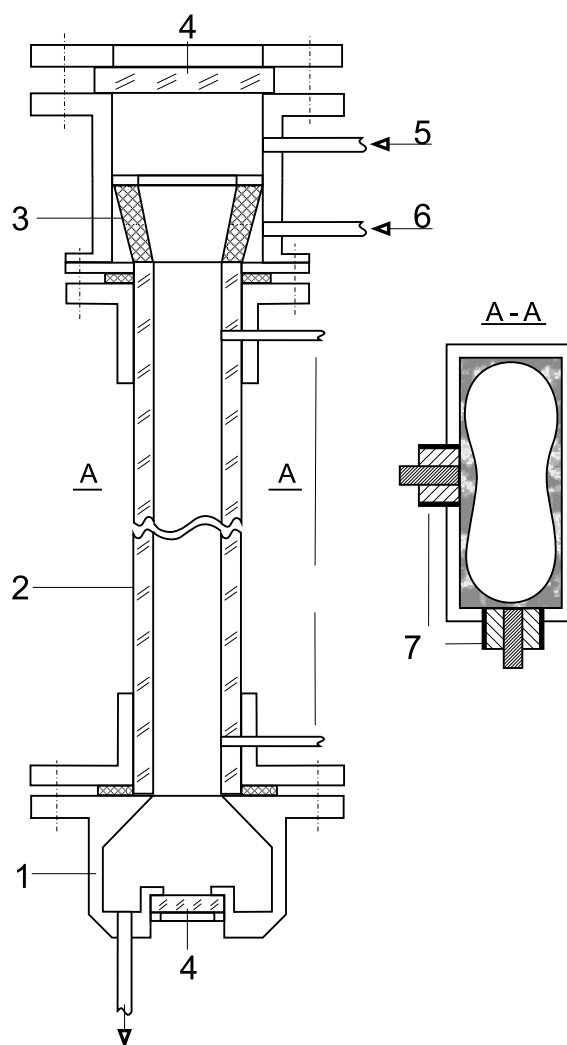


Рис. 8. Схема рабочего участка.

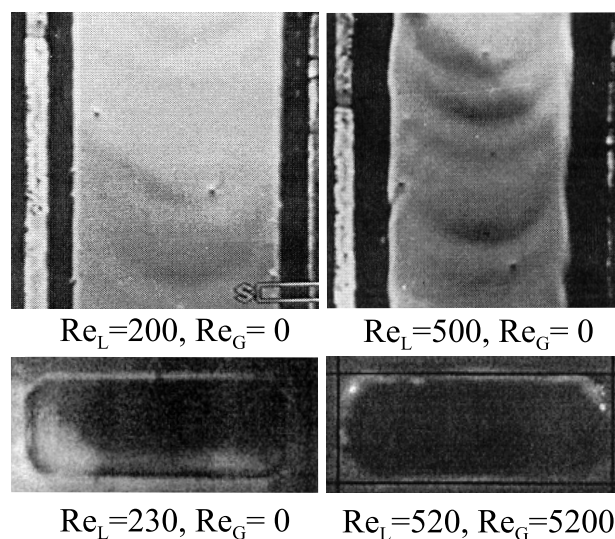


Рис. 9. Опускное течение жидкого азота в прямоугольном канале.

в виде пленки с практически гладкой поверхностью, на которой имеются волны малой амплитуды. На узкой стороне канала толщина пленки также очень мала. Основная часть жидкости течет в углах канала. При течении чистой жидкости или со спутным потоком пара с небольшим расходом на широкой стенке канала всегда наблюдались волны U-образной формы. Для больших расходов жидкости U-образная форма волн на широкой стороне канала сохраняется, частота их следования становится выше. На узкой стенке миниканала толщина пленки существенно возрастает.

Изменение толщины пленки во времени, характерные амплитуды волн показаны на рис. 10. При малых расходах жидкости, до чисел Рейнольдса 700–800, толщина пленки и амплитуда волн на широкой и узкой стенках существенно различаются. Режимы течения пленки на широкой и узкой стенках являются независимыми, каждый со своими волновыми характеристиками и средней толщиной пленки.

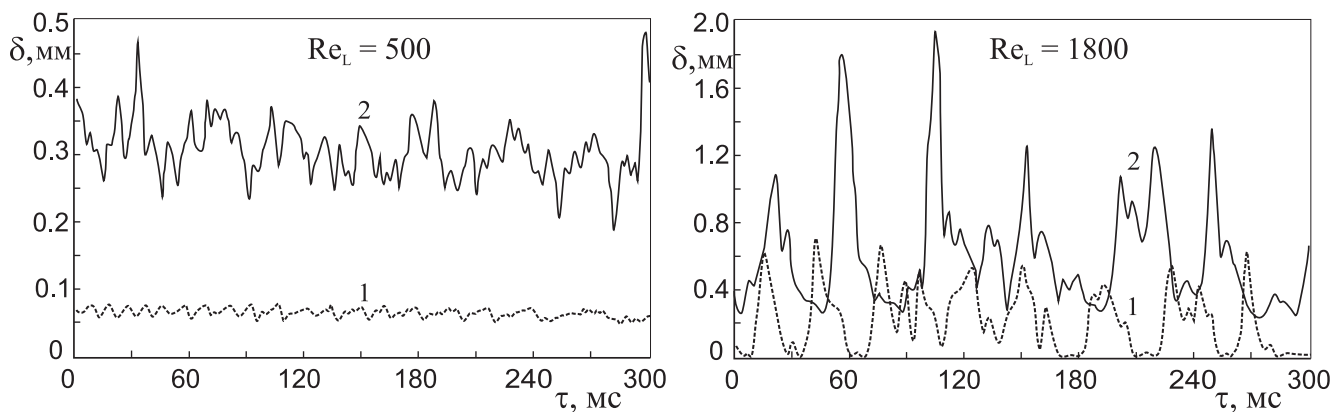


Рис. 10. Толщина пленки жидкого азота. 1 — широкая стенка, 2 — узкая стенка.

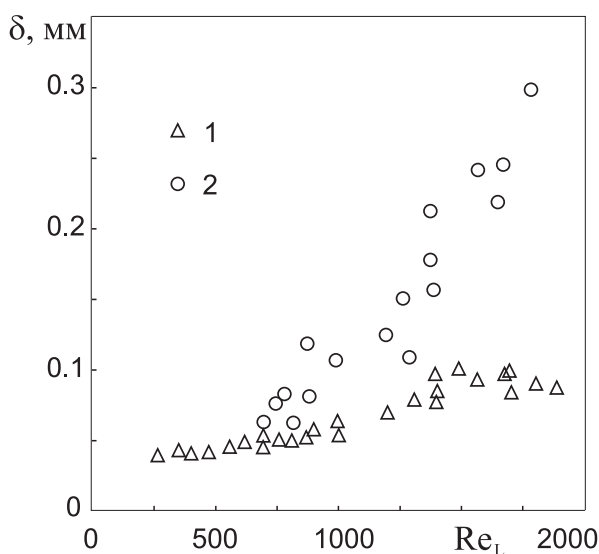
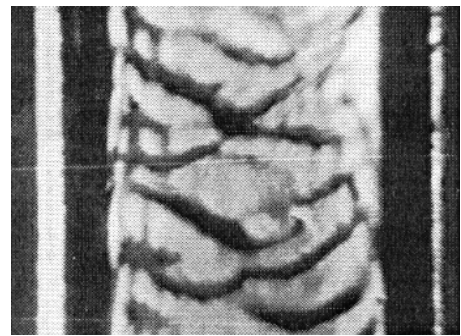


Рис. 11. Зависимость средней толщины пленки от числа Рейнольдса. 1 — широкая стенка, 2 — узкая стенка.

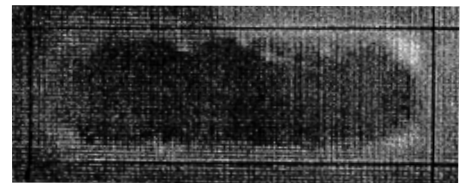
При числах Рейнольдса жидкой фазы порядка 1000 и выше течение на широкой и узкой стенках становится взаимосвязанным. В этих условиях на узкой и на широкой стенках канала возникают волны большой амплитуды.

Средняя толщина пленки на узкой стенке значительно превышает толщину пленки на широкой стенке канала, особенно при больших числах Рейнольдса (рис. 11). Средняя толщина пленки на широкой стенке канала в результате переток жидкости на узкую стенку становится более чем в два раза меньше расчетной по теории Нуссельта.

В п. 2.4 приведены результаты исследования опускного течения жидкого азота при спутном потоке пара. Существенное влияние пара на структуру течения в канале начинается при скоростях, соответствующих числу Рейнольдса паровой фазы выше 10 000. При этих условиях поперечный размер волн уменьшается, на широкой стенке наблюдаются 2–3 волны (рис. 12). При числах Рейнольдса $Re_G > 15\,000$ поверхность пленки покрывается мелкой рябью, в ядре потока появляются капли жидкости. Этот режим аналогичен дисперсно-кольцевому течению в круглой трубе. На узкой стенке канала амплитуда волн велика даже при низких скоростях пара. При больших скоростях пара ($Re_G = 15\,000 - 20\,000$) волны на широкой и узкой стенках взаимодействуют друг с другом, возникают волны большой амплитуды, которые могут перекрывать всё сечение канала. В конечном итоге показано, что под действием потока пара при переходе к дисперсно-кольцевому течению толщина плёнки выравнивается по периметру прямоугольного миниканала.



$Re_L=500, Re_G=15000$



$Re_L=504, Re_G=20515$

Рис. 12. Опускное течение жидкого азота и спутного потока пара в прямоугольном миниканале.

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.

В п. 3.1 приведен обзор литературы по теплообмену в стекающих пленках на гладких и структурированных поверхностях. На основании анализа литературы были определены цель и задачи исследования, выбраны типы структурированных поверхностей для исследования интенсификации теплообмена в стекающих пленках.

Схема экспериментальной установки для изучения теплообмена и кризисных явлений в стекающих пленках жидкости, методика измерения основных параметров приведены в п. 3.2. Основным элементом установки является герметичная колонна высотой 1.5 м, диаметром 0.27 м (рис. 13). Течение пленки бинарной смеси хладонов R114/R21 осуществляется по наружной поверхности вертикальных цилиндров длиной 200 мм, диаметром 50 мм. Жидкость поступает на рабочий участок через щелевой распределитель. Число Рейнольдса изменялось от 30 до 370 ($Re = G/\pi d\mu$). Для обогрева рабочих участков использовался устанавливаемый внутрь нагревательный элемент (4). Начальная концентрация летучего компонента в смеси изменялась в диапазоне от 4 до 19%.

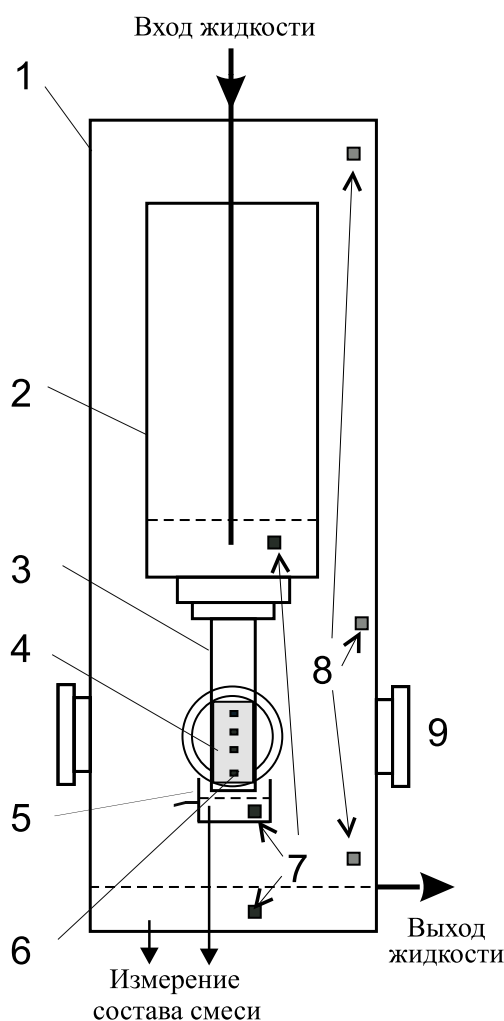


Рис. 13. Схема установки для изучения теплообмена в стекающих пленках смесей хладонов. 1 — теплоизолированная колонна; 2 — расходный бак; 3 — рабочий участок; 4 — зона обогрева рабочего участка; 5 — приемный коллектор; 6–8 — места измерения температуры; 9 — окна.

дано обобщение данных и сопоставление полученных результатов с данными на гладкой поверхности в режимах испарения и пузырькового кипения. Характерные размеры поверхностных структур рабочих участков (расстояние между впадинами ромбовидной структуры, шаг ребер на оребренной поверхности) 1–1.5 мм, глубина впадин на ромбовидной и оребренной поверхностях 0.3–0.4 мм. Относительные коэффициенты теплоотдачи на поверхности с горизонтальным оребрением и на поверхности с ромбовидной структурой показаны на рис. 15. При малых числах Рейнольдса (рис. 15а) коэффициенты теплоотдачи на оребренной поверхности на 10–20% ниже, чем на гладкой поверхности во всем диапазоне изменения тепловых потоков. На поверхности с ромбовидной структурой в режиме испарения наблюдается

Рабочее давление ≈ 2 бар. Жидкость в установке находится в состоянии насыщения под давлением собственных паров. Концентрация компонентов смеси измерялась с погрешностью не более 3%. Погрешность измерения расхода жидкости не превышала 5%. Погрешность определения коэффициентов теплоотдачи не превышала 16%. Рабочие участки с различными типами структурированных поверхностей показаны на рис. 14.

В п. 3.3 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.

В п. 3.4 рассмотрены общие вопросы исследования теплообмена в стекающих пленках. Показано отличие кривых кипения на гладкой и структурированных поверхностях, приведены опытные данные по измерению локальных коэффициентов теплоотдачи по длине рабочих участков, по условиям образования сухих пятен при различных расходах жидкости.

В п. 3.5 приведены результаты исследования теплообмена в стекающих пленках на рабочих участках с горизонтальным оребрением и ромбовидной структурой. Проведено

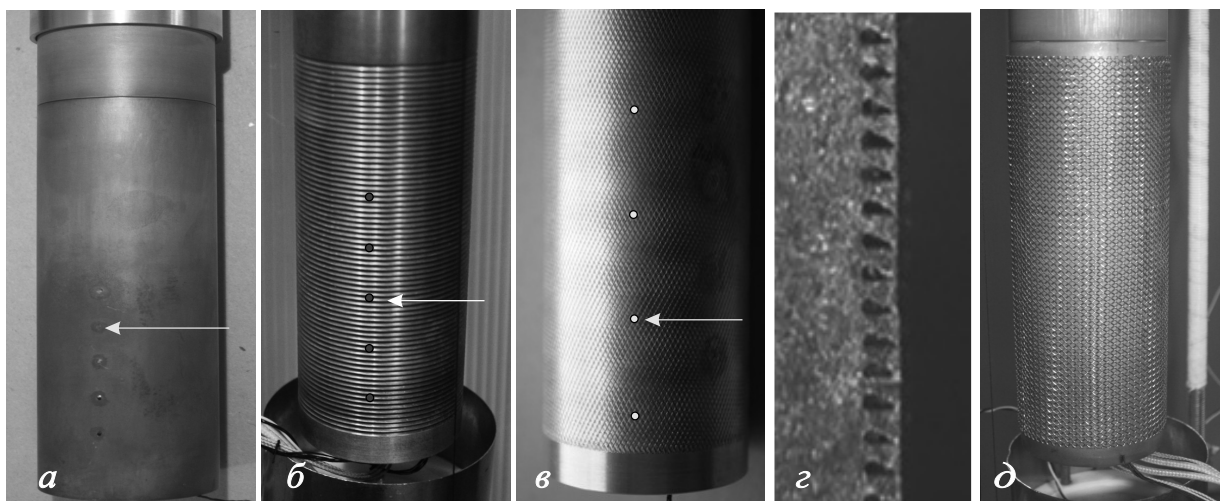


Рис. 14. Рабочие участки. *а* — гладкая поверхность; *б* — поверхность с горизонтальным оребрением; *в* — поверхность с ромбовидной структурой; *г* — микроструктурированная поверхность; *д* — поверхность с сетчатым покрытием. Стрелками показаны места установки термопар.

незначительное увеличение коэффициентов теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью. При более высоких тепловых потоках коэффициенты теплоотдачи на поверхности с ромбовидной структурой снижаются по сравнению с гладкой поверхностью. При больших числах Рейнольдса (рис. 15б) относительные коэффициенты теплоотдачи на всех исследованных поверхностях возрастают с увеличением теплового потока, достигают максимума при тепловых потоках $q \approx 1\text{--}1.5 \text{ Вт/см}^2$, затем уменьшаются до единицы. В режиме испарения наибольшая интенсификация теплообмена достигается на поверхности с горизонтальным оребрением. При развитом пузырьковом кипении ($q > 2 \text{ Вт/см}^2$) коэффициенты теплоотдачи на структурированных поверхностях практически совпадают с коэффициентами теплоотдачи на гладкой поверхности.

Причина ухудшения теплоотдачи на оребренной трубе при малых расходах жидкости заключается в том, что в этих режимах горизонтальные впадины заполняются жидкостью, эффективная толщина пленки и её термическое сопротивление возрастают по сравнению с гладкой поверхностью (рис. 16а).

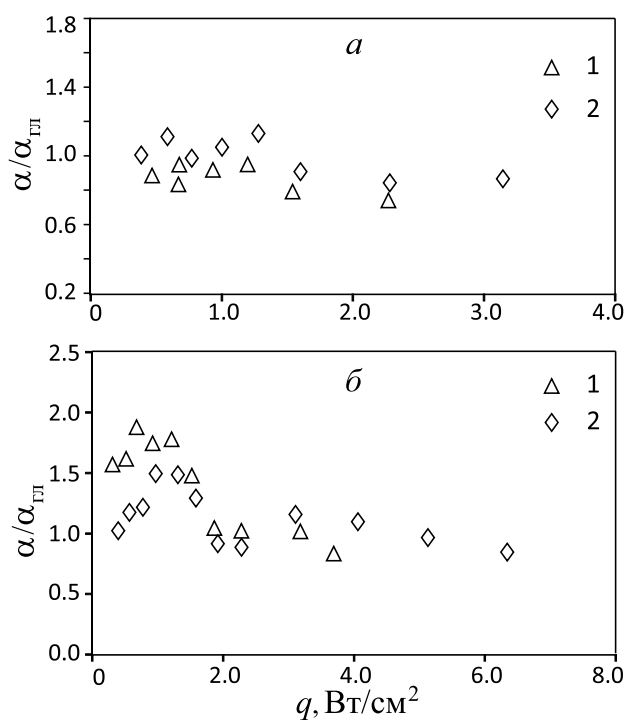


Рис. 15. Относительные коэффициенты теплоотдачи на структурированных поверхностях. *а* — $Re_{пл} = 52$; *б* — $Re_{пл} = 160$. 1 — оребренная поверхность; 2 — ромбовидная структура.

Интенсификация теплообмена в режиме испарения наблюдается только при появлении мелкомасштабных трехмерных волн на поверхности стекающей пленки при более высокой плотности орошения (рис. 16б). Для интенсификации теплообмена на поверхности с горизонтальными ребрами необходимо создание специальных дренажных каналов, препятствующих накоплению жидкости во впадинах. Пересекающиеся под углом 60° к горизонту каналы на поверхности с ромбовидной структурой способствуют более равномерному распределению жидкости по периметру во всем диапазоне изменения расходов (рис. 16в).

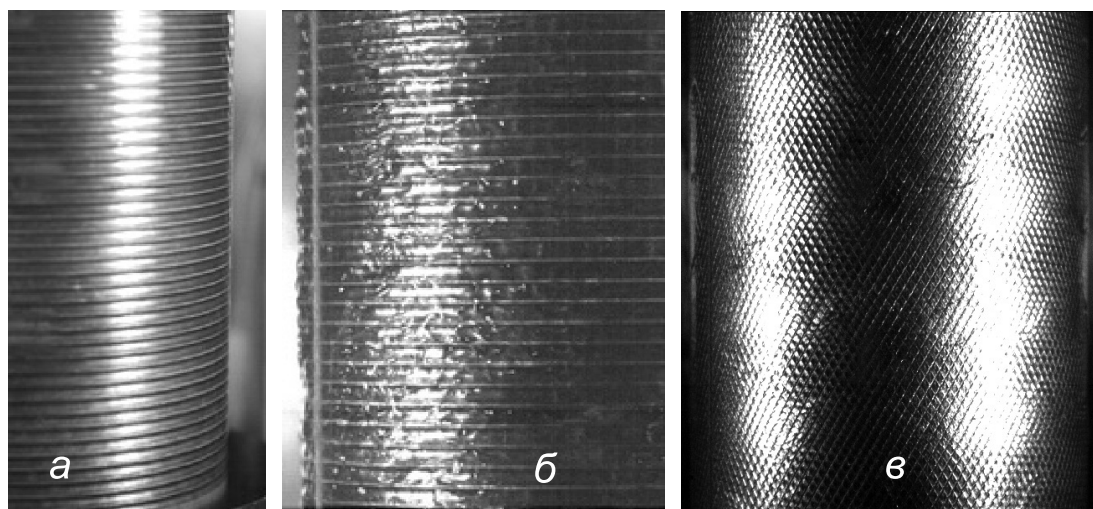


Рис. 16. Режимы течения пленки. *a* — затопление каналов оребрения, $Re = 26$; *б* — развитие мелкомасштабных волн, $Re = 105$; *в* — течение пленки на поверхности с ромбовидной структурой, $Re = 78$.

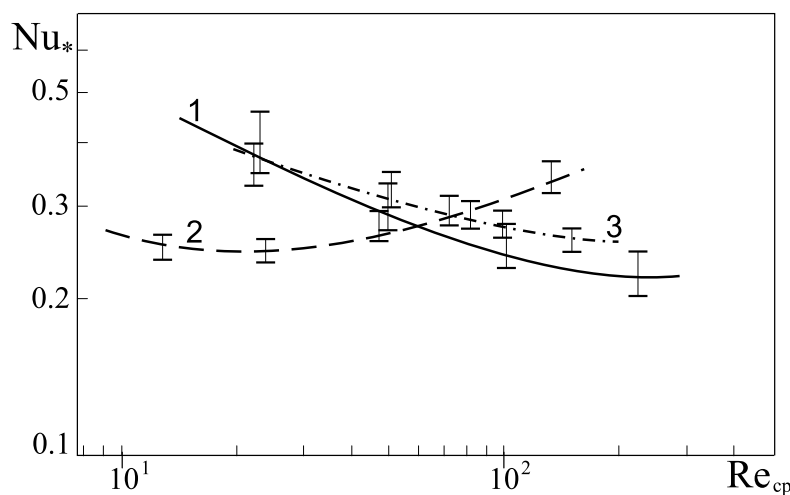


Рис. 17. Теплоотдача при испарении стекающей пленки смеси хладонов на гладкой и профилированных поверхностях. Экспериментальные данные ($p = 1.9 - 2.1$ бар): 1 — гладкая поверхность; 2 — поверхность с горизонтальным оребрением; 3 — поверхность с ромбовидной структурой.

Обобщение приведенных выше экспериментальных данных по теплоотдаче в режиме испарения показано на рис. 17. Число Рейнольдса рассчитывалось как среднее значение между входом и выходом. Безразмерные коэффициенты теплоотдачи $Nu_* = \alpha\delta/\lambda$, где $\delta = (\nu^2/g)^{1/3}$, в режиме испарения на гладкой поверхности уменьшаются с увеличением числа Рейнольдса по такому же закону, как предсказывают известные зависимости (Чжунь, Себан 1971; Alhusseini et al. 1998). Коэффициенты теплоотдачи на поверхности с горизонтальным оребрением при чис-

лах Рейнольдса $Re < 70$ –80 меньше, чем на гладкой поверхности. При более высоких расходах жидкости наблюдается интенсификация теплообмена по сравнению с гладкой поверхностью. Показано, что на поверхности с ромбовидной структурой вследствие более равномерного распределения жидкости по периметру коэффициенты теплоотдачи выше, чем на гладкой поверхности.

Кипение в тонкой пленке обладает рядом особенностей по сравнению с кипением в большом объеме. Визуальные наблюдения и видеосъемка процесса кипения в стекающей пленке показывают, что паровые пузыри находятся в пленке жидкости только на начальном этапе роста. Затем пузыри быстро увеличиваются в размере, достигая величины 5–6 мм. Далее паровые пузыри сливаются в конгломераты и стекают в виде кипящих струй. Для обобщения данных по кипению жидкости в стекающих пленках смеси фреонов были использованы подходы Лабунцова, Ягова, Гогонина. Полученные данные по теплоотдаче при кипении на поверхностях

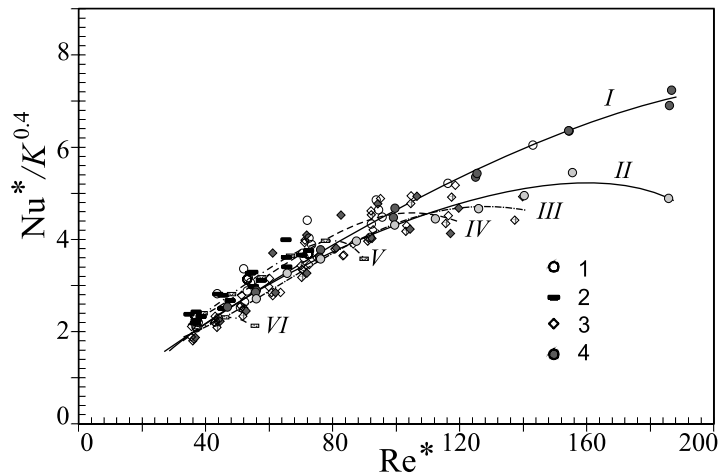


Рис. 18. Обобщение данных по теплоотдаче при кипении в стекающих пленках: 1 – гладкая поверхность; 2 – поперечное оребрение; 3 – ромбовидная структура; 4 – гладкая поверхность, хладагент R21; I – расчет по формуле Гогонина (2010); II – хладагент R21, $Re = 100$; III – поверхность с ромбовидной структурой, $Re = 160$; IV – поверхность с ромбовидной структурой, $Re = 100$; V – поперечное оребрение, $Re = 160$; VI – поперечное оребрение, $Re = 50$.

с различными структурами удовлетворительно обобщаются корреляцией I (рис. 18), полученной в работе Гогонина (2010) для кипения в стекающих пленках на гладкой поверхности. Отклонение данных от обобщающей зависимости (линии II–VI) связано с возникновением сухих пятен на поверхности. В числа Нуссельта Nu^* и Рейнольдса Re^* в качестве характерных величин входят постоянная Лапласа и скорость парообразования.

В п. 3.6 приведены данные по теплообмену в стекающей пленке на поверхностях с микроструктурой. Для интенсификации теплообмена при кипении производятся теплообменные поверхности, имеющие, как правило, развитую систему каверн для удержания пара (Webb, 2004). Одним из методов создания поверхности с упорядоченной микроструктурой, обеспечивающим наличие большого количества регулярно расположенных подповерхностных полостей, является метод деформирующего резания, разработанный в МГТУ им. Баумана (Thors and Zoubkov, 2013; Зубков, 2014). Структура поверхности, созданной этим методом, показана на рис. 14з. Шаг и высота ребер поверхностей составляют 100–200 и 220–440 мкм. Подповерхностные полости, чередующиеся с открытыми полостями, получены сминанием вершин ребер в процессе изготовле-

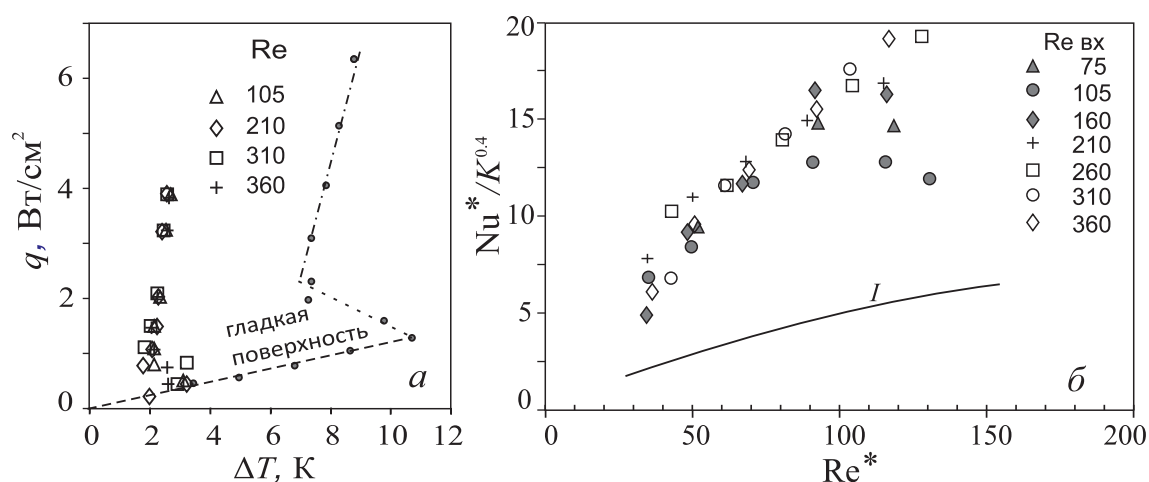


Рис. 19. Теплообмен при кипении на поверхности с микроструктурой: *а* — кривая кипения; *б* — сравнение результатов экспериментов с расчетом по формуле Гогонина, 2010 (линия *I*).

ния. Зависимость теплового потока от температурного напора для поверхности с шагом ребер 100 мкм показана на рис. 19*а*. При достижении разности температур «стенка – жидкость» 3–3.5 К начинается кипение в плёнке, температурный напор скачком, как и на гладкой поверхности, уменьшается до 2 К. Обработка данных по теплоотдаче при кипении стекающей пленки на этой поверхности представлена на рис. 19*б*. Безразмерные коэффициенты теплоотдачи при кипении в пленке на микроструктурированной поверхности более чем в три раза превышают коэффициенты теплоотдачи на гладкой поверхности.

В п. 3.7 представлены результаты исследования теплообмена в стекающих пленках на поверхностях с внешней шероховатостью в виде проволочных сеток. В обзоре литературы показано, что установка металлических сеток на поверхности со стекающей пленкой приводит к улучшению распределения жидкости по теплоотдающей поверхности. В работе исследовано влияние геометрических характеристик сетчатых покрытий на теплообмен при гравитационном течении пленок жидкости. Использовались металлические сетки из латуни и нержавеющей стали с размерами ячеек от 1.6 до 6 мм.

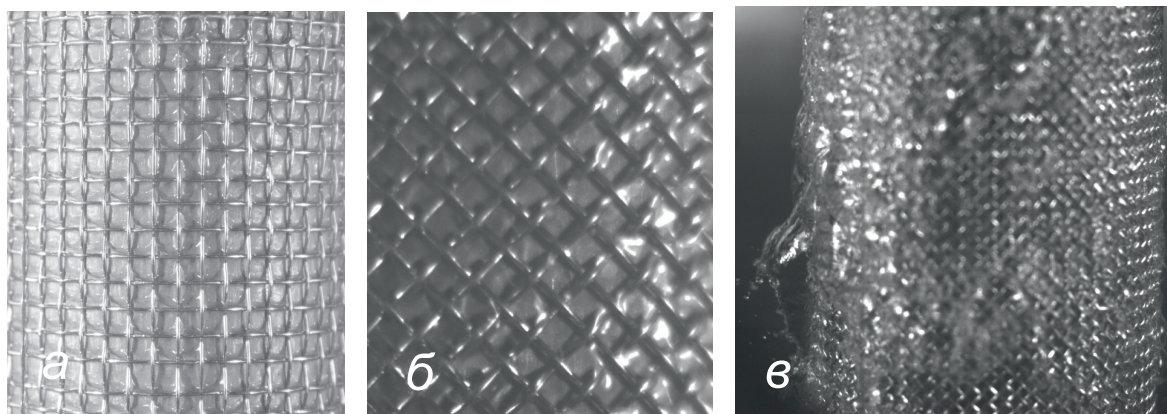


Рис. 20. Течение пленки на поверхностях с сетчатыми покрытиями: *а* — размер ячеек 6 мм; *б* — размер ячеек 1.6 мм, диагональное расположение; *в* — пузырьковое кипение, размер ячеек 1.6 мм.

Для всех типов сетчатых покрытий при малых расходах жидкости за счет действия капиллярных сил по всему периметру ячеек вокруг проволочек образуются мениски, в центральной части ячеек происходит уменьшение толщины пленки (рис. 20). При больших расходах жидкость стекает вниз не только в зазоре под проволочкой, но может также перетекать через проволочки сетки. Режим пузырькового кипения в стекающей пленке при больших тепловых потоках характеризуется образованием пузырей большого размера, покрывающих практически всю поверхность трубы. График зависимости коэффициентов теплоотдачи от плотности теплового потока приведен на рис. 21. Показано, что в режиме испарения коэффициенты теплоотдачи возрастают с увеличением размера ячеек, что обусловлено увеличением удельной поверхности с малой толщиной пленки внутри ячейки. Влияние материала сетки и ориентации проволочек на теплообмен не обнаружено. В режиме пузырькового кипения интенсификация теплообмена по сравнению с гладкой поверхностью отсутствует.

В п. 3.8 приведены опытные данные по критическому тепловому потоку в стекающих пленках на поверхностях с различной структурой. Ухудшение теплоотдачи при течении плёнок на обогреваемой поверхности при больших тепловых потоках связано с возникновением сухих пятен. Величина теплового потока, вызывающего появление на теплоотдающей поверхности устойчивых сухих пятен, соответствует критическому тепловому потоку (КТП). Кризис теплообмена для ламинарно-волнового течения пленки определяется закономерностями возникновения сухих пятен, характерными для режима испарения волновой пленки жидкости, а величина критического теплового потока может быть рассчитана по зависимости (Павленко, Лель, 1997):

$$q_{кр} = r\rho' \left(\frac{\delta_{ост}^3 g}{3\nu' l_{cp}} + 0.25 k \delta_{ост} f_{cp} \right), \quad (3)$$

где: $\delta_{ост}$ — толщина остаточного слоя, м; l_{cp} — средняя длина крупных волн, м; f_{cp} — частота прохождения крупных волн, s^{-1} ; k — коэффициент обновления. По этой модели удовлетворительно обобщаются данные по КТП на гладкой поверхности, на поверхности с горизонтальным оребрением, линия II на рис. 22 (Володин, дисс. 2014). Величины КТП для ромбовидной структуры и сетчатого покрытия поверхности в области чисел Рейнольдса $Re = 25-100$ превышают КТП как для гладкой, так и для поперечно оребренной поверхностей.

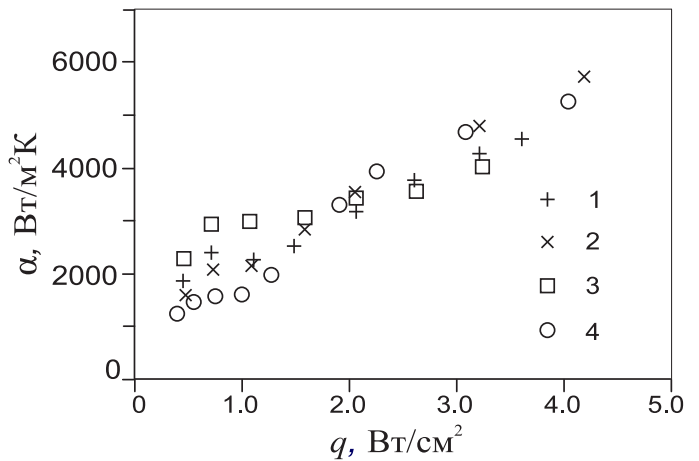


Рис. 21. Зависимость коэффициентов теплоотдачи от теплового потока на поверхности с сетчатыми покрытиями, $Re = 80$; размер ячеек, мм: 1 — 1.6; 2 — 3.3; 3 — 6; 4 — гладкая поверхность.

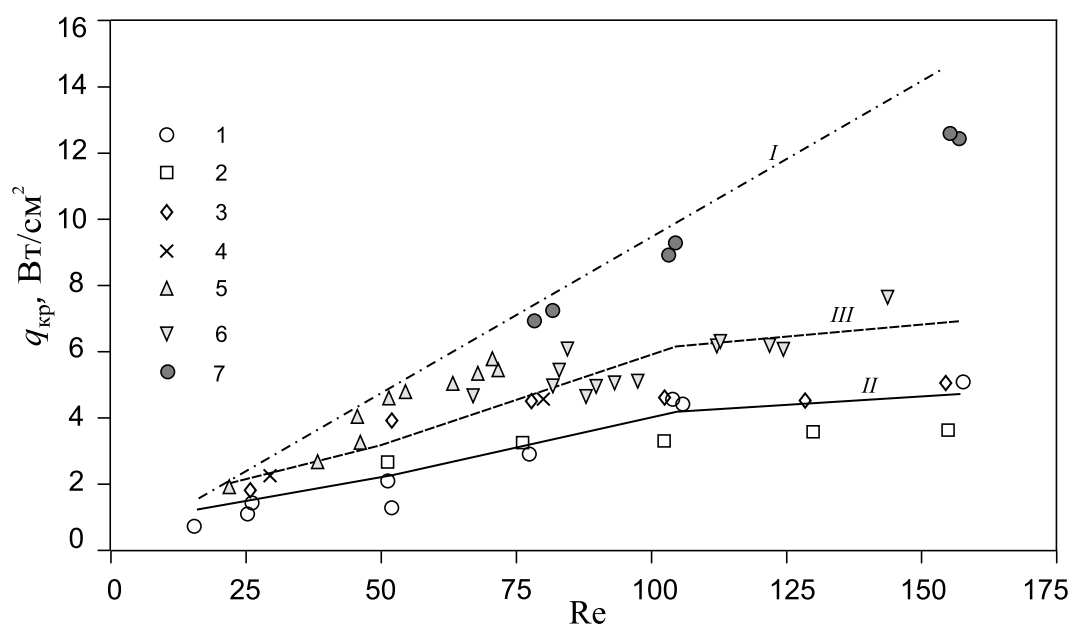


Рис. 22. Зависимость критического теплового потока от числа Рейнольдса. Смесь хладонов R114/R21: 1 — гладкая поверхность; 2 — поверхность с горизонтальным оребрением; 3 — поверхность с ромбовидной структурой; 4 — сетчатое покрытие; 5, 6 — данные Christians and Thome (2012) (поверхность Gewa-B5), для хладонов R236fa и R134a соответственно; 7 — данные для участка с подповерхностными полостями. *I* — тепловой поток, соответствующий полному испарению жидкости на выходе рабочего участка. Расчетные зависимости: *II* — формула (3); *III* — модифицированная зависимость (3).

На поверхностях с сетчатыми покрытиями происходит увеличение количества жидкости, удерживаемой на поверхности. Расчет критического теплового потока с поправкой, учитывающей увеличение толщины остаточного слоя жидкости, показан на рис. 22 линией *III*. Эта корреляция дает наилучшее согласие с опытными данными для ромбовидной структуры и сетчатого покрытия в области малых чисел Рейнольдса и удовлетворительно описывает результаты для модифицированных труб Gewa-B5, приведенные в работе Christians and Thome (2012).

Максимальные критические тепловые потоки в экспериментах были достигнуты на рабочих участках с подповерхностными полостями (рис. 22). На поверхности с шагом ребер 100 мкм происходит практически полное выпаривание жидкости в стекающей пленке, а критический тепловой поток приближается к величине, соответствующей её полному испарению.

В четвертой главе приведены результаты исследования тепломассопереноса при противоточном течении жидкости и пара в каналах структурированных насадок в процессе разделения смесей в ректификационной колонне. В п. 4.1 на основе обзора литературы определены задачи комплексных исследований гидродинамики и массообмена при противоточном течении пара и жидкости в регулярных насадках на крупномасштабных моделях дистилляционных колонн.

Дистилляция и ректификация являются чрезвычайно энергоемкими процессами, поэтому эффективность разделения является одним из главных пара-

метров, определяющих эксплуатационные расходы, капитальные затраты и габариты оборудования. Характер совместного течения жидкости и пара, интегральная эффективность разделения смесей по данным ряда работ сложным и неоднозначным образом зависят от величин расходов жидкости и пара, соотношения между ними, высоты используемых насадок, способов установки структурированных насадок в колонну. В последнее время интенсивно развивается новое направление в разделении многокомпонентных смесей — применение колонн с разделительными стенками, для чего необходимы исследования разделения смесей на насадках с некруглым поперечным сечением.

В п. 4.2 приведены характеристики структурированных насадок (рис. 23), 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. Гидравлический диаметр треугольных каналов насадки имеет величину 4–8 мм, он связан с площадью удельной поверхности насадки в единице объема a ($d_h = 4/a$).

В п. 4.3 приведено описание экспериментальной установки для исследования гидродинамики и массопереноса при противоточном течении пара и жидкости в сложных канальных системах структурированных насадок в дистилляционных колоннах. Дана характеристика рабочей смеси, приведено описание методики проведения экспериментов, обработки экспериментальных данных и формы их представления.

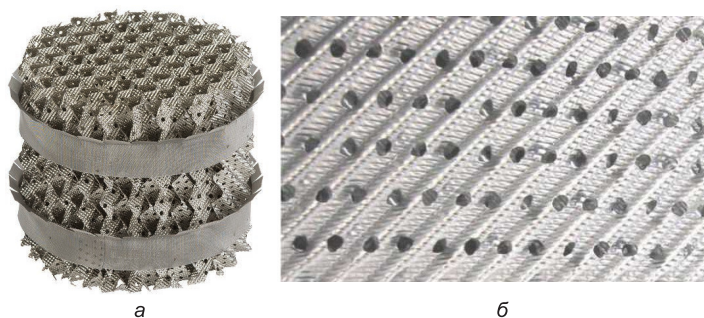


Рис. 23. Структурированная насадка: *a* — один слой; *б* — отдельный лист; (Sulzer Chemtech Ltd).

Эксперименты по исследованию гидродинамики и массопереноса при противоточном течении пара и жидкости в каналах структурированных насадок проведены на крупномасштабной модели дистилляционной колонны. Установка состоит из следующих основных блоков: разделительной колонны, контура конденсации пара, контура испарения жидкости, системы управления и контроля режимных параметров, системы измерения локальных характеристик потоков внутри колонны, системы измерения состава бинарной смеси, системы удаления рабочей смеси из установки, станции хранения рабочих веществ. Разделительная колонна представляет собой сосуд диаметром 0.9 м, высотой 6.8 м. Общая высота насадки в колонне может варьироваться от 0.2 до 4 м. Внутри основной колонны могут устанавливаться вставки с различной формой поперечного сечения. Удельная нагрузка колонны по жидкости (для $D = 0.9$ м) от 4 до 16 м³/(м²·с), массовый расход пара от 1 до 4 кг/с. Установленная мощность для создания потока пара составляет ≈ 800 кВт, рабочее

давление 3 бар. Отношение мольных расходов жидкости и пара в экспериментах изменялось от $L/V = 1$ до 1.7.

В п. 4.4 приведены результаты экспериментального исследования влияния режимных параметров, характеристик структурированной насадки и способов её установки в разделительную колонну на эффективность разделения и гидравлическое сопротивление.

Высота колонны является одним из важнейших параметров, которые определяются при проектировании (Кафаров, 1979). Промышленные колонны большой высоты делят на секции с установкой перераспределителей жидкости и пара между ними для уменьшения влияния неравномерности распределения потоков пара и жидкости по сечению колонн. Определение оптимальной высоты секций колонн является актуальной технико-экономической задачей. Влияние высоты насадки на эффективность разделения смесей исследовалось в колонне диаметром 0.9 м на насадках Koch1Y с удельной поверхностью $a = 420 \text{ м}^2/\text{м}^3$, общая высота 1.2 и 2.1 м, и Mellapak 350Y ($a = 350 \text{ м}^2/\text{м}^3$; $H = 2.1$ и 4 м). Результаты экспериментов для насадки Mellapak 350Y в виде зависимости высоты, эквивалентной теоретической тарелке (ВЭТТ) от

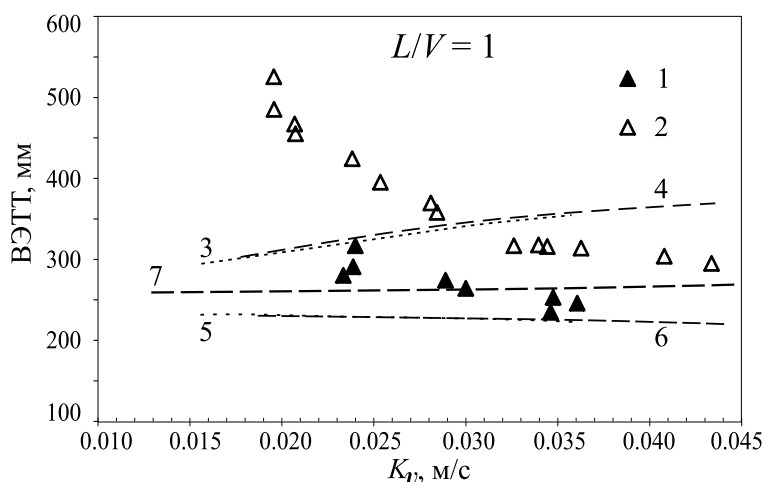


Рис. 24. Влияние количества слоев насадки Mellapak 350Y на эффективность разделения. Эксперимент: 1 — 10 слоёв; 2 — 19 слоёв. Расчет по моделям Olujić et. al. (3, 4) и Bravo et. al. (5, 6) для 10 слоёв (3, 5) и 19 слоёв (4, 6); 7 — данные для насадки Mellapak 350Y (Sulzer Chemtech Ltd. 2014).

нагрузки колонны по пару $K_v = U_v \sqrt{\rho_v} / \sqrt{\rho_l - \rho_v}$ в сравнении с расчетом по моделям Bravo et. al. (1985) и Olujić et. al. (1999), а также с данными производителя насадки Mellapak компании «Зульцер» (Sulzer Chemtech Ltd. 2014) показаны на рис. 24. Увеличение высоты насадки приводит к значительному снижению общей эффективности разделения. Часто используемые модели не предсказывают зависимость эффективности разделения смеси от высоты насадки. Совпадение результатов экспериментов с данными производителя насадки удовлетворительное.

Большая часть экспериментальных исследований эффективности разделения при тестировании различных насадок и тарелок проводится в условиях отсутствия отбора флегмы из конденсатора. Мольные расходы жидкости и пара при этом одинаковы ($L/V=1$). В ректификационных колоннах в нижней части до тарелки питания обычно $L/V > 1$, в верхней части колонны — меньше единицы. Считается, что эффективность насадок при $L/V \neq 1$ такая же, как и при полном возврате флегмы (Kister, 1992). Приведенные ниже данные показывают влияние отношения расходов жидкости и пара на эффективность разделения смеси.

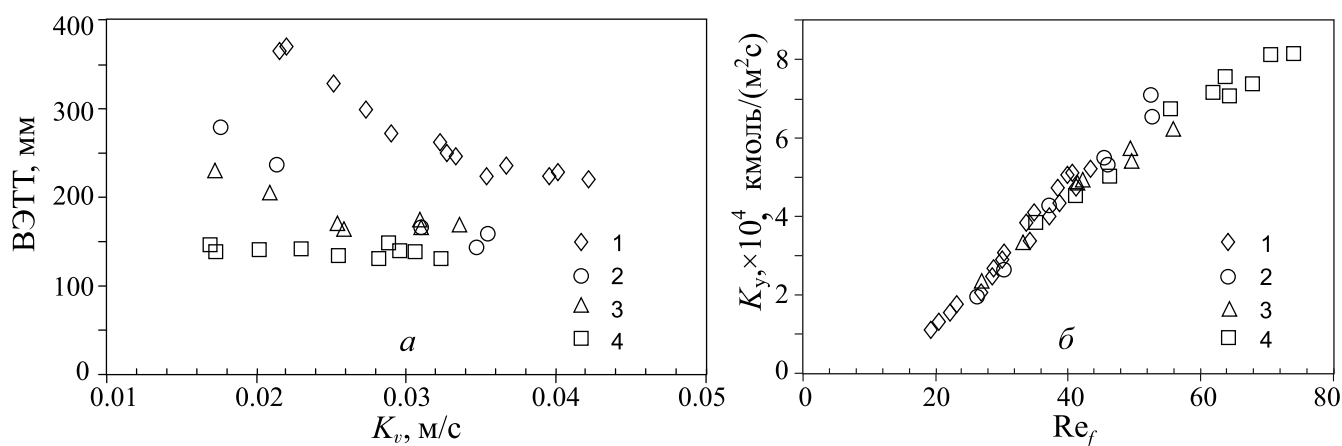


Рис. 25. Влияние отношения расходов жидкости и пара на ВЭТТ (а) и на коэффициенты массопередачи (б), L/V : 1 — 1; 2 — 1.4; 3 — 1.5; 4 — 1.7.

Эксперименты по исследованию влияния отношения расходов жидкости и пара на эффективность разделения и гидравлическое сопротивление проводились на 10 слоях насадки Koch1Y в круглой колонне диаметром 0.9 м при четырех значениях L/V : 1, 1.4, 1.5 и 1.7. Результаты экспериментов показаны на рис. 25. С увеличением отношения L/V ВЭТТ уменьшается. Данные по эффективности разделения для различных значений L/V удовлетворительно обобщаются в виде зависимости коэффициентов массопередачи K_y от числа Рейнольдса пленки Re_f (рис. 25б).

Углы вращения слоёв структурированной насадки определяют перемешивание жидкости по сечению и высоте колонн. Изменение углов вращения слоёв насадки позволяет исследовать взаимосвязь между распределением потоков по сечению колонны и эффективностью разделения смеси. Эксперименты проводились в колонне диаметром 0.9 м на насадке с удельной поверхностью 500 м²/м³ при $L/V=1.7$. Слои насадки устанавливались с углами вращения 20° и 70°. Для усиления влияния неравномерности распределения потоков внутри колонны создавалась начальная неравно-

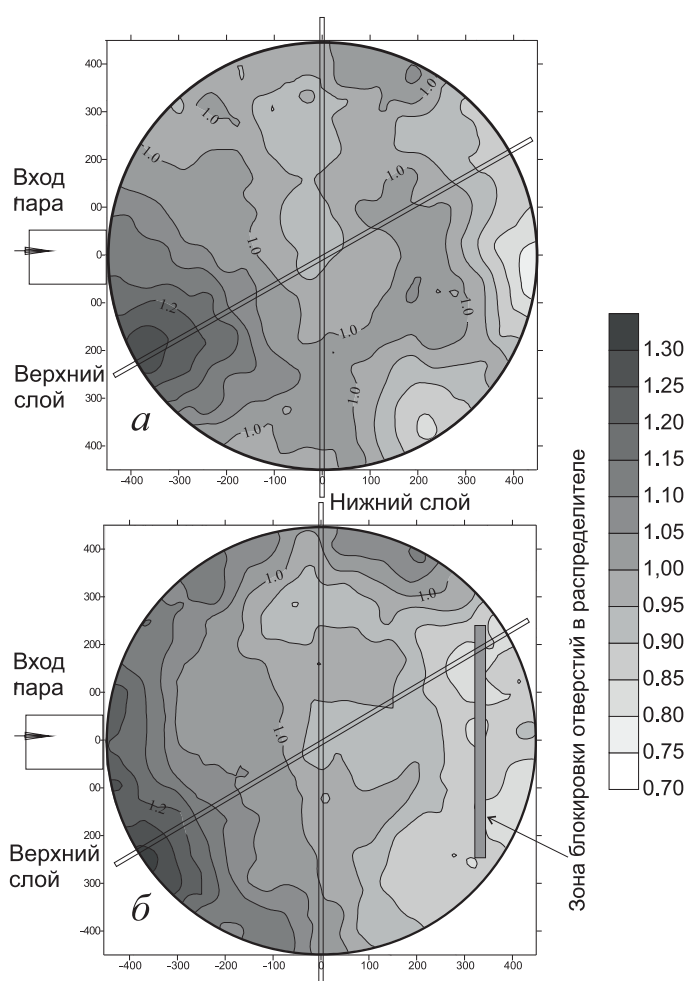


Рис. 26. Распределение относительного расхода жидкости под насадкой. Угол вращения слоёв 20°; $K_v = 0.02$ м/с; равномерное (а) и неравномерное (б) орошение.

мерность орошения насадки путем закрытия 10% отверстий в днище распределителя. Для иллюстрации на рис. 26 показано распределение локального расхода жидкости под насадкой при различных условиях орошения насадки сверху колонны. Под заблокированным рядом отверстий распределителя на выходе из насадки с углом вращения слоёв 20° наблюдается зона с сильно уменьшенным расходом жидкости. Область пониженного расхода жидкости сохраняет своё положение по всей высоте насадки.

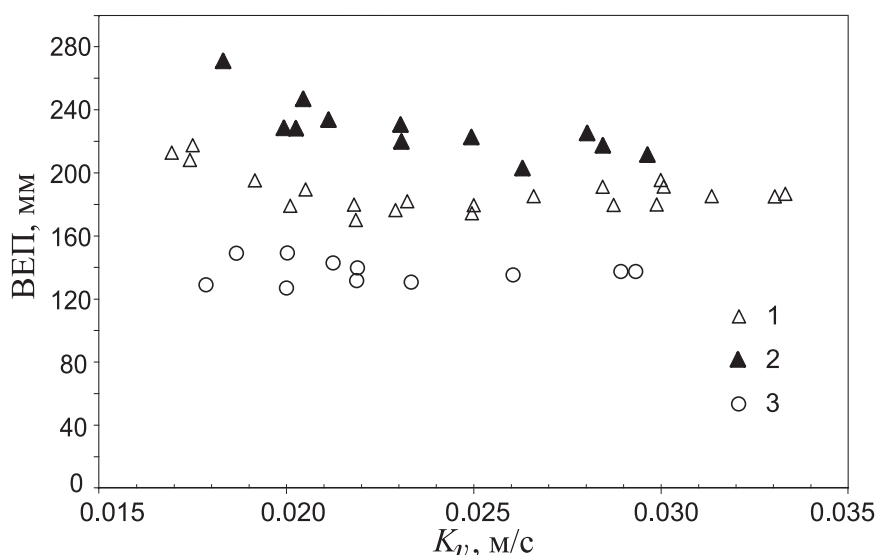


Рис. 27. Влияние угла вращения слоёв на эффективность разделения. Неравномерное орошение насадки: 1 — $\alpha = 70^\circ$; 2 — $\alpha = 20^\circ$; равномерное орошение насадки: 3 — $\alpha = 70^\circ$.

Результаты измерения интегральной эффективности разделения в этих условиях показаны на рис. 27. С уменьшением угла вращения слоёв насадки эффективность разделения смеси при начальной неравномерности орошения ухудшается. При равномерном орошении насадки влияние угла вращения слоёв на эффективность разделения не столь существенно. Относительный перепад давления практически

не зависит от высоты насадки, от угла вращения слоёв и от начальной неравномерности орошения насадки в исследованном диапазоне изменения расходов пара и жидкости. Приведенные результаты показывают взаимосвязь между распределением локального расхода жидкости по сечению колонны и эффективностью разделения смеси.

В п. 4.5 приведены результаты исследования эффективности разделения смеси и гидравлического сопротивления в колоннах с некруглым поперечным сечением. Колонны с разделительными стенками (DWC) являются интенсивно развивающимися системами для разделения многокомпонентных смесей. Они имеют огромный потенциал для энергосбережения и уменьшения капитальных затрат. Большая часть публикаций по этой тематике посвящена разработке и анализу термодинамических схем технологического цикла разделения многокомпонентных смесей. В литературе отсутствуют данные по эффективности разделения смесей в нецилиндрических колоннах. В работе исследовано влияние расходов жидкости и пара, их отношения, высоты насадки, угла наклона ребер насадки на эффективность разделения, гидравлическое сопротивление в круглой, полуцилиндрической и квадратной вставках, установленных в экспериментальной модели ректификационной колонны (рис. 28).

Высота насадки изменялась от 1.2 до 3.3 м (6–16 слоёв). В экспериментах были исследованы насадки с углом наклона ребер 45° и 60° с удельной поверхностью $\approx 500 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Эксперименты проведены при $L/V = 1$ и 1.7. Сравнение данных по эффективности разделения смеси, полученных на структурированных насадках с различной формой поперечного сечения, показано на рис. 29. При малых значениях параметра K_v величина ВЭТТ для всех форм поперечного сечения насадки оказывается примерно одинаковой. В диапазоне изменения параметра K_v от 0.045 до 0.066 м/с для насадки с углом наклона ребер 45° наблюдается сильное влияние формы поперечного сечения колонны на эффективность разделения смеси: наименьшие значения величины ВЭТТ получены на круглой насадке, наибольшие значения — на квадратной насадке. До начала развития гидравлического

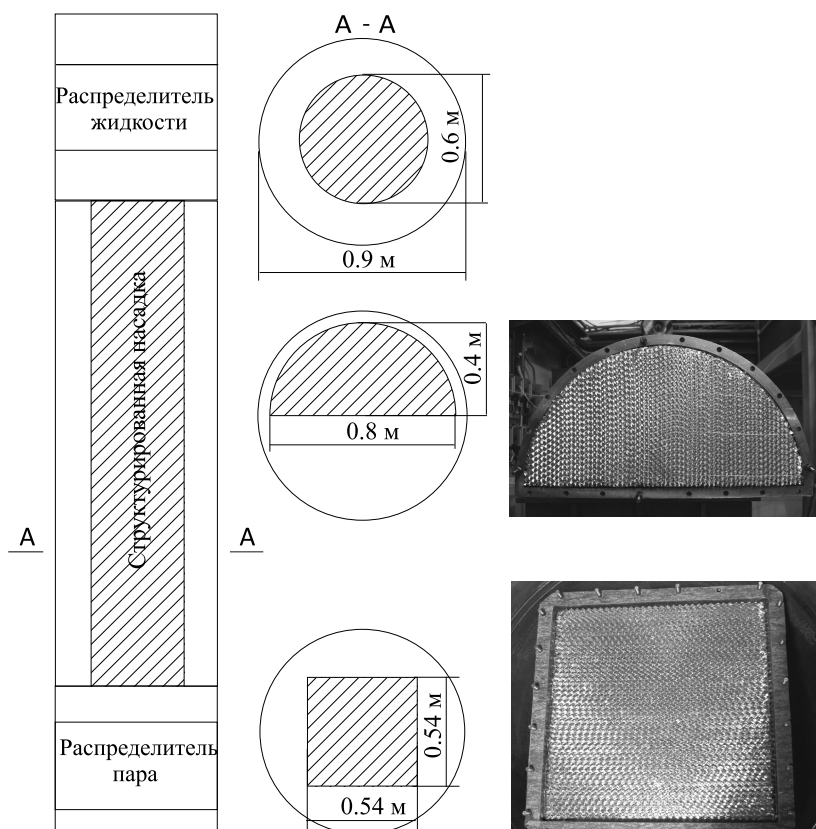


Рис. 28. Схема установки вставок с различной формой поперечного сечения в экспериментальную колонну.

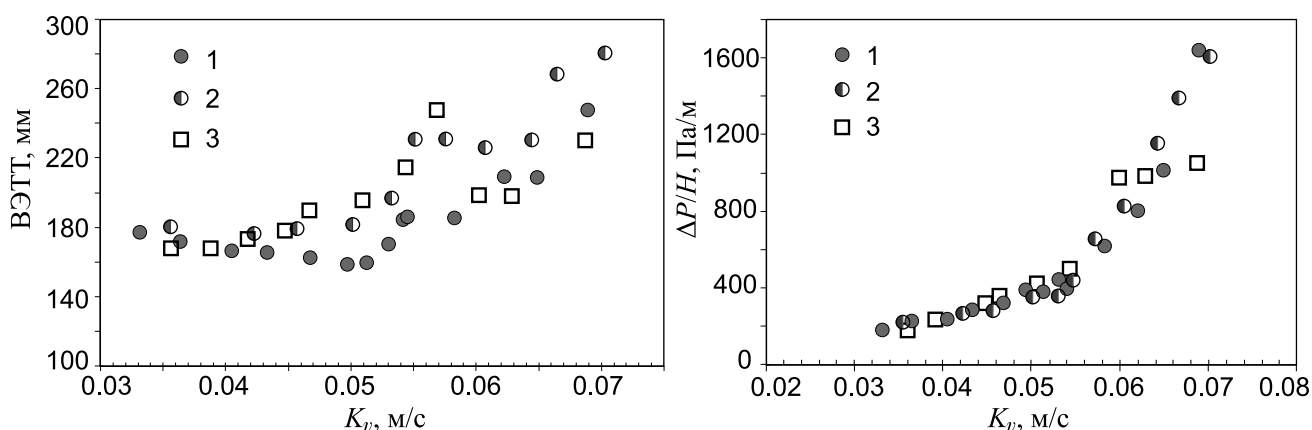


Рис. 29. Эффективность разделения и перепад давления на структурированных насадках с различной формой поперечного сечения. 11 слоёв, угол наклона ребер 45° , $L/V = 1$. 1 — круглая насадка; 2 — полуцилиндрическая насадка; 3 — квадратная насадка.

кризиса относительный перепад давления практически не зависит от формы поперечного сечения колонны. На полуцилиндрической насадке зависимость перепада давления от параметра K_v практически совпадает с аналогичной зависимостью для круглой насадки.

Эффективность разделения на насадке с углом наклона ребер 60° оказалась значительно ниже, чем на насадке с углом наклона ребер 45° (рис. 30). Перепад давления на этой насадке уменьшился более чем в два раза. Величина ВЭТТ возросла на 40–50%, но при этом в широком диапазоне изменения нагрузки оставалась примерно постоянной. Кризис гидравлического сопротивления начинается при существенно больших значениях параметра K_v , чем насадке с углом наклона ребер 45° .

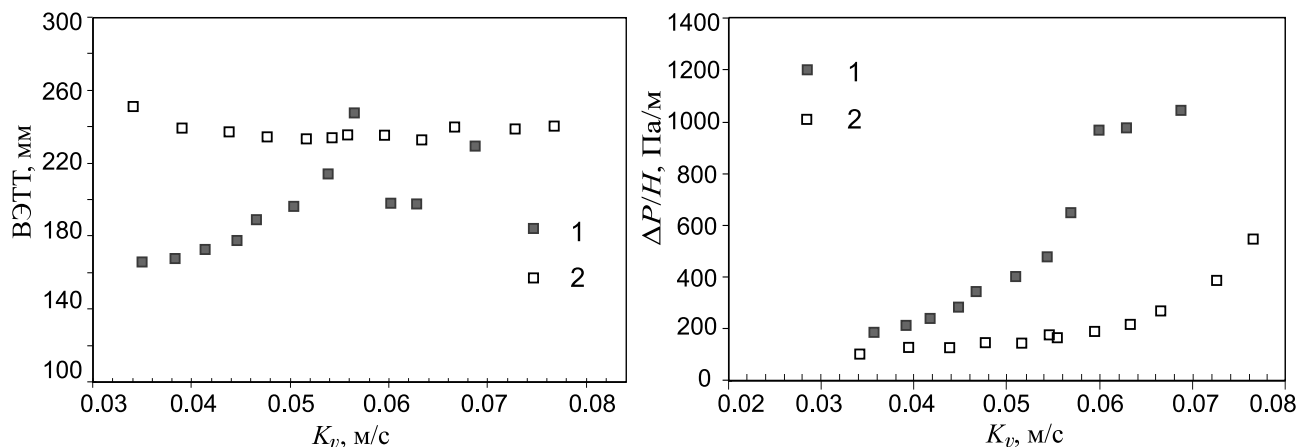


Рис. 30. Эффективность разделения и перепад давления на структурированных насадках с различным углом наклона ребер в квадратной колонне. 1 — 45° ; 2 — 60° .

На рис. 31 показано сравнение эффективности разделения в колоннах с различной формой поперечного сечения на насадке с углом наклона ребер 60° .

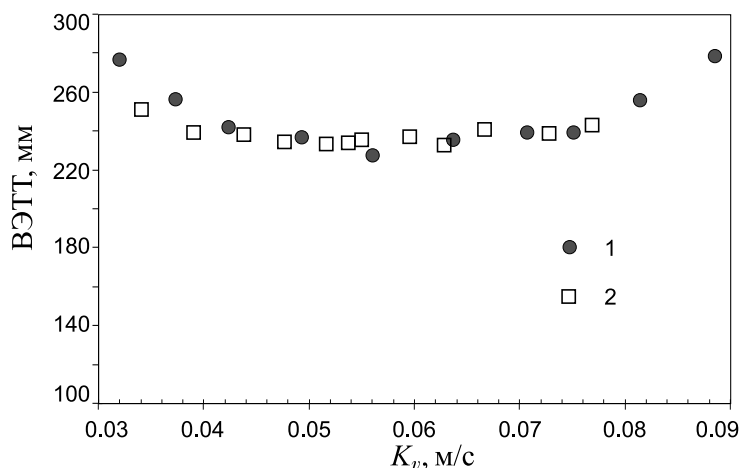


Рис. 31. Эффективность разделения на структурированных насадках с различной формой поперечного сечения. 10 слоёв, угол наклона ребер 60° , $L/V = 1$. 1 — круглая насадка; 2 — квадратная насадка.

В отличие от насадки с углом наклона ребер 45° , эффективность разделения во всём диапазоне изменения нагрузки колонны для круглой и квадратной насадок оказалась практически одинаковой. Ухудшение разделения при больших расходах пара происходит постепенно, в отличие от насадки с меньшим углом наклона ребер. Относительный перепад давления на этой насадке также не зависит от формы поперечного сечения.

В серии экспериментов с полумонолитической насадкой исследовалось влияние числа слоёв насадки, отношения расходов жидкости и пара на эффективность разделения и гидравлическое сопротивление. Показано, что характер влияния этих параметров на эффективность разделения и перепад давления такой же, как и в цилиндрических колоннах.

Распределение локального расхода жидкости по сечению в колоннах с некруглым поперечным сечением характеризуется повышенным расходом в центральной части и пониженным расходом в пристенной и угловых зонах. Характер распределения зависит от формы сечения колонны и от угла наклона ребер структурированной насадки. Неравномерность распределения потоков жидкости и пара по сечению и по высоте колонн нецилиндрической формы создает предпосылки для уменьшения эффективности разделения.

В Приложении к главе 4 диссертации приведено описание моделей расчета массообмена, которые использовались в работе для оценки влияния различных параметров на эффективность массопереноса и перепад давления на структурированных насадках в процессе разделения смесей.

Заключение

1. 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.

2. Проведено экспериментальное исследование пленочного течения жидкого азота и спутного потока пара в щелевом 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.

3. Проведены экспериментальные исследования и получены новые экспериментальные данные по интенсификации теплообмена в стекающих пленках на структурированных поверхностях различных типов: с профилированной поверхностью, с подповерхностными полужамкнутыми полостями, с внешней шероховатостью в виде металлических сеток. 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.

4. Проведено экспериментальное исследование 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.

5. 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.

Полученные результаты исследований тепло – и массопереноса при течении двухфазных газо- и парожидкостных потоков в каналах с различными масштабами, формой и структурой поверхности являются основой для создания высокоэффективного тепломассообменного оборудования в энергетике, криогенной и низкотемпературной технике, химической технологии.

Список публикаций по теме диссертации

1. Pavlenko A.N., Pecherkin N.I., Zhukov V.E., Nazarov A.D., Meski G., Houghton P. Separation efficiency of mixtures by distillation using structured noncircular packings // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. 2018. Vol. 133. P. 211-220. (из перечня ВАК)
2. Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Nazarov A.D., Meski G., Houghton P. Mixture separation in distillation column with semi-cylindrical structured packing // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1105 P. 012064 (из перечня ВАК)
3. Volodin O.A., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Zubkov N.I. and Bityutskaya Yu.L. Heat transfer at boiling of R114/R21 refrigerants mixture film on microstructured surfaces // Journal of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 891. P. 012035. (из перечня ВАК)
4. Pavlenko A., Zhukov V., Pecherkin N., Nazarov A., Li X., Liu M., Sui H., Li H. Effect of the structured packing height on efficiency of freons mixture separation in a large-scale model of distillation column // MATEC Web of Conf. 2017. Vol. 115 P. 08003. (из перечня ВАК)
5. Pecherkin N., Pavlenko A., Volodin O. Heat transfer and crisis phenomena at the film flows of freon mixture over vertical structured surfaces // Heat Transfer Engineering. 2016. Vol. 37(3–4). P. 257-268. (из перечня ВАК)

6. Pavlenko A.N., Zeng J., Pecherkin N.I., Zhukov V.E., and Volodin O.A. Separation efficiency and pressure drop of SiC ceramic and Mellapak structured packings // Journal of Engineering Thermophysics. 2016. Vol. 25(1). P. 1–14. (из перечня ВАК)
7. Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Heat transfer and critical heat flux at evaporation and boiling in refrigerant mixture films falling down the tube with structured surfaces // Intern. Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 90(11). P. 149–158. (из перечня ВАК)
8. Pavlenko A., Zhukov V., Pecherkin N., Chekhovich V., Volodin O., Shilkin A. and Grossmann C. Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing // AIChE Journal. 2014. Vol. 60(2). P. 690–705. (из перечня ВАК)
9. Володин О.А., Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Сердюков В.С. Испарение и кипение пленки бинарной смеси фреонов на вертикальном цилиндре с сетчатым покрытием // Вестник НГУ. 2014. Т. 9(1). С. 70–78. (из перечня ВАК)
10. Володин О.А., Павленко А.Н., Печеркин Н.И. Теплообмен и волновые характеристики при течении пленки бинарной смеси фреонов по поверхности с трехмерной текстурой // Теплофизика высоких температур 2013. Т. 51(6). С. 864–874. (из перечня ВАК)
11. Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Володин О.А. Теплообмен и кризисные явления при кипении в пленках смесей фреонов, стекающих по оребренной трубе // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19(2). С. 143–154. (из перечня ВАК)
12. Володин О.А., Печеркин Н.И. Теплообмен и кризисные явления в пленках смесей фреонов, стекающих по структурированной поверхности // Тепловые процессы в технике. 2012. Т. 4(2). С. 56–67. (из перечня ВАК)
13. Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Володин О.А. Теплоотдача при испарении стекающих пленок смеси фреонов на гладкой и структурированной поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18(4). С. 605–616. (из перечня ВАК)
14. Павленко А.Н., Жуков В.Е., Печеркин Н.И., Чехович В.Ю., Сандер С., Хоуптон П. Развитие неравномерности распределения состава смеси в структурированной насадке дистилляционной колонны // Теоретические основы химической технологии. 2010. Т. 44(6). С. 651–659. (из перечня ВАК)
15. Pavlenko A.N., Pecherkin N.I., Chekhovich V.Yu., Volodin O.A. Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry // Microgravity Sci. Technology. 2009. Vol. 21, Suppl. Issue 1. P. 207–213. (из перечня ВАК)
16. Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Чехович В.Ю., Жуков В.Е., Сандер С., Хауптон П. Экспериментальное исследование влияния неравномерности орошения на входе структурированной насадки на эффективность разделения смеси фреонов // Теоретические основы химической технологии. 2009. Т. 43(1). С. 3–13. (из перечня ВАК)

17. Pecherkin N.I., Chekhovich V.Yu. Mass transfer in a two-phase flow in a curvilinear channel // Journal of Engineering Thermophysics. 2008. Vol. 17(2). P. 113–119. (из перечня ВАК)
18. Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Чехович В.Ю., Жуков В.Е., Сандер С., Хауптон П., Серов А.Ф., Назаров А.Д. Разделение смесей и распределение жидкости на структурированной насадке в крупномасштабной модели дистилляционной колонны // Теоретические основы химической технологии. 2006. Т. 40(4). С. 355–365. (из перечня ВАК)
19. Павленко А.Н., Мацех А.М., Печеркин Н.И., Кнеер Р., Лель В.В., Суртаев А.С. Теплообмен и кризисные явления при интенсивном испарении в стекающих волновых плёнках жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 1. С. 93–105. (из перечня ВАК)
20. Pavlenko A., Pecherkin N., Chekhovich V., Zhukov V., Sunder S., Houghton P., Serov A., Nazarov A. Large industrial-scale model of structured packing distillation column // Journal of Engineering Thermophysics. 2005. V.13, No. 1. P. 1–18. (из перечня ВАК)
21. Pavlenko A., Pecherkin N., Chekhovich V., Zhukov V., Sunder S., Houghton P., Serov A., Nazarov A. Two-phase Cocurrent Downflow of Liquid Nitrogen in a Vertical Rectangular Channel // Journal of Engineering Thermophysics. 2002. V. 11, No. 4. P. 321–333. (из перечня ВАК)
22. Серов А.Ф., Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Назаров А.Д., Кротов С.В., Жуков В.Е. Пузырьковый расходомер для исследования струйно-капельного течения в массообменных аппаратах // Приборы и техника эксперимента. 1998. Т. 5 С. 145–149. (из перечня ВАК)
23. Кротов С.В., Назаров А.Д., Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Серов А.Ф., Чехович В.Ю. Емкостной измеритель локальной толщины пленки жидкости // Приборы и техника эксперимента. 1997. № 1. С. 149–152. (из перечня ВАК)
24. Чехович В.Ю., Печеркин Н.И. Тепломассообмен и трение на стенке в вертикальном газожидкостном потоке // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1989. № 4. С. 3–11. (из перечня ВАК)
25. Противоточная колонна с динамически управляемым распределителем жидкости / Павленко А.Н., Серов А.Ф., Назаров А.Д., Печеркин Н.И., Жуков В.Е., Миськив Н.Б., Володин О.А. – Патент RU 2631701 Рос. Федерация: заявитель и патентообладатель ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, заявка № 2016134296 от 22.08.2016; дата гос. рег. 26.09.2017. (из перечня ВАК)
26. Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Володин О.А. Теплообмен и кризисные явления в стекающих пленках жидкости при испарении и кипении / монография; под ред. В.Е. Накорякова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. – 193 с.
27. Pecherkin N., Chekhovich V. Mass Transfer in Two-Phase Gas-Liquid Flow in a Tube and in Channels of Complex Configuration / Mass Transfer in Multiphase

Systems and its Applications. Ed. by Mohamed El-Amin. — Croatia: InTech, 2011. Chapter 8. P. 155–178. DOI: 10.5772/14914 (глава в книге)

28. Volodin O., Pecherkin N., Pavlenko A., Zubkov N. Heat transfer and crisis phenomena at boiling of refrigerant films falling down the surfaces obtained by deformational cutting // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer* 2017. Vol. 5. P. 215–222.

29. Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Flow dynamics, heat transfer and crisis phenomena in the films of binary freon mixtures, falling over the structured surface // *Intern. Journal of Fluid Mechanics Research*. 2012. Vol. 39(2). P. 125–135.

30. Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Жуков В.Е., Назаров А.Д., Мески Г., Хоптон П. Влияние формы поперечного сечения колонны на эффективность разделения бинарной смеси на структурированных насадках // *Интерэкспо Гео-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр: Междунар. науч. конф «СибОптика-2018»* (Новосибирск, 23-24 апреля 2018 г.): сб. материалов в 2 т. – Новосибирск, СГУГиТ, 2018. Т.1. – С. 226 - 232.

31. Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. Влияние типа структурирования поверхности на теплоотдачу при испарении и кипении в стекающих пленках // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2017. Т. 5, № 1. С. 157–162.

32. Володин О.А., Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. Теплообмен при кипении в условиях пленочного течения бинарной смеси хладонов по поверхности с микроструктурой / *Инновационная наука*. 2016. № 12. С. 8–15.

33. Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Володин О.А., Чжан Л., Ли Х. Применение сетчатых покрытий для интенсификации теплообмена в стекающих пленках // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2016. Т. 5, № 1. С. 15–21.

34. Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Володин О.А. Испарение и кипение пленки смеси хладонов, стекающей по цилиндру с сетчатым покрытием // *Инновационная наука*. 2016. № 9. С. 15–22.

35. Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Heat transfer in falling film of the refrigerants mixture on a vertical tube with wire mesh // *Proc. of 3rd International Workshop on Heat Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control (IWHT2015)*. October 16-19, 2015, Taipei, Taiwan – 2015.

36. Keller T., Eiswirth R., Shilkin A., Knosche C., Pavlenko A., Pecherkin N., Zhukov V. Maldistribution in packed columns – new findings, old challenges // *Proc. 10th International Conference on Distillation & Absorption 2014*, 14–17 September 2014, Friedrichshafen, Germany. 2014. P. 288–293.

37. Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Sunder S., Meski G. Mixture separation on a structured packings designed for dividing wall columns // *Proc. 21 Int. Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2014*. 23–27 August 2014, Prague, Czech Republic. CD-ROM. Ser. Num. 0486. 2014.

38. Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Володин О.А., Чехович В.Ю., Цой А.Н. Теплообмен и кризисные явления при кипении и испарении в стекающих пленках смесей фреонов // Труды 5 Российской Национальной Конф. по Теплообмену (РНКТ5), 25–29 октября 2010 г., Москва: Изд. МЭИ, 2010. Т. 4. С. 142.
39. Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Володин О.А. Локальный теплообмен в стекающих пленках смесей фреонов на структурированной поверхности // Теплофизические основы энергетических технологий: Сб. научн. трудов Всероссийской научно-практической конф. Под ред. Г.В. Кузнецова, А.С. Заворина, К.В. Бувакова. Томск : Изд. ТПУ, 2010. С. 31–35.
40. Жуков В.Е., Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Чехович В.Ю. Использование кремниевых диодов для исследования динамики формирования крупномасштабной температурной неравномерности внутри структурированной насадки дистиляционной колонны / Интерэкспо Гео-Сибирь 2008. Т. 4, № 2. С. 166.
41. Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Чехович В.Ю., Жуков В.Е., Серов А.Ф., Назаров А.Д. Использование емкостного метода измерений для регистрации локальных гидродинамических параметров парожидкостных потоков в микроканалах // Интерэкспо ГеоСибирь. 2007. Т. 4, № 2. С. 173–178.
42. Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Чехович В.Ю., Жуков В.Е., Серов А.Ф., Назаров А.Д. Двухфазное опускное течение жидкого азота в вертикальном прямоугольном канале // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем. Процессы, модели, эксперимент. 2004. Т. 9, № 2(18). С. 56–63.
43. Печеркин Н.И., Чехович В.Ю., Нигматулин Б.И. Экспериментальное исследование распределения локальных коэффициентов массоотдачи на стенках каналов сложной формы // Труды Второй Российской Национальной Конференции по Теплообмену РНКТ2, 26–30 октября 1998 года, г. Москва. Т. 5. Москва: Изд. МЭИ, 1998. С. 67–70.
44. Pecherkin N., Chekhovich V. Gas-liquid flow in channel with abrupt expansion // Proc. of the Third Intern. Conf. on Multiphase Flow ICMF-98, Lyon, France, June 8-12, 1998. CD-ROM, No. 441. Lyon, France. 1998. 3 p.

Подписано к печати 29 декабря 2018 г. Заказ № 19
Формат 60 × 84/16. Объем 2 уч.-изд. л. Тираж 120 экз.

Отпечатано в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1