

На правах рукописи



**Городилов Александр Андреевич**

**Интенсификация процесса  
теплообмена в контактных  
аппаратах с регулярной насадкой**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Москва – 2016**

Работа выполнена на кафедре «Процессы и аппараты химической технологии» ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»

Научный руководитель: кандидат химических наук, профессор  
**Беренгартен Михаил Георгиевич**, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Сидягин Андрей Ананьевич**, профессор кафедры «Технология и оборудование химических и пищевых производств» Дзержинского политехнического института (филиала) ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»

кандидат технических наук, доцент  
**Чагин Олег Вячеславович**, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»

Ведущая организация: **ОАО «Научно-исследовательский и проектный институт азотной промышленности и продуктов органического синтеза»**

Защита состоится «30» июня 2016 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.204.03 при РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047 г. Москва, Миусская пл., д. 9) в конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на сайте <http://diss.muctr.ru>.

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.204.03

Женса А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Процессы тепломассообмена между газом и жидкостью находят широкое распространение в химической, нефтеперерабатывающей промышленности, энергетике и т.д. Значительный интерес представляет процесс передачи тепла между газом и жидкостью при их непосредственном соприкосновении. Наиболее интенсивно процессы теплообмена между газовой и жидкой фазами протекают при непосредственном соприкосновении теплоносителей в насадочных контактных аппаратах. В аппаратах данного типа более высокие значения коэффициентов теплопередачи могут быть получены при меньших удельных энергозатратах, что предопределяет их высокую энергоэффективность. В то же время, процесс контактного теплообмена на насадках изучен недостаточно, а в литературе редко встречаются методики расчета контактных теплообменных аппаратов. Таким образом, совершенствование оборудования для контактного теплообмена при непосредственном соприкосновении газа и жидкости в насадочных аппаратах, а также более глубокое исследование этого процесса, является актуальной задачей химической технологии.

**Цель работы.** Повышение эффективности процесса контактного теплообмена при соприкосновении газового потока и жидкости за счет использования новой насадки с гофрировано-просечной поверхностью.

### Основные задачи исследования

- разработка новой эффективной конструкции регулярной насадки;
- исследование особенностей гравитационного течения плёнки жидкости по поверхности новой насадки;
- исследование процесса контактного теплообмена в условиях перекрёстного тока между газом и плёнкой жидкости, гравитационно стекающей по поверхности новой насадки;
- разработка методики расчета контактного тепломассообменного аппарата с разработанной насадкой.

### Научная новизна диссертации

- Установлено, что на поверхности плёнки жидкости, стекающей по поверхности исследуемой насадки, образуются стоячие волны, амплитуда которых уменьшается до нуля с увеличением плёночного числа Рейнольдса до  $Re_{пл} \approx 2200$ .

- Установлено, что при подаче орошающей жидкости на одну сторону элемента ГПН-насадки, имеет место перетекание плёнки жидкости на другую сторону через щели в поверхности насадки. Установлена зависимость количества жидкости, перетекающей через щели с одной стороны элемента ГПН-насадки на другую от плотности орошения.

- Выявлены стадии и установлены особенности механизма перетекания плёнки жидкости с одной стороны элемента ГПН-насадки на другую, которое наступает при значениях  $Re_{пл} > 1320$ .

- Для оценки чувствительности регулярных насадок с перфорацией к равномерности орошения, предложен безразмерный симплекс, представляющий собой отношение количества жидкости, перетекающей с одной стороны элемента насадки на другую, к общему расходу жидкости.

- Изучен процесс охлаждения воды атмосферным воздухом в аппарате с ГПН-насадкой. Установлено, что расход орошающей жидкости не влияет на коэффициент массоотдачи при плотности орошения, соответствующей плёночному числу Рейнольдса:  $320 < Re_{пл} < 4400$ .

- Установлено, что предлагаемая насадка, по сравнению с плоскопараллельной насадкой аналогичных размеров и конфигурации блока, обладает более высокой эффективностью, и позволяет осуществлять процесс при скоростях газа, достигающих 2,5 м/с, при этом обеспечивая интенсификацию процесса тепломассообмена в 1,5 – 2,5 раза при тех же расходах теплоносителей.

#### **Практическая значимость.**

- Результаты работы могут быть использованы на предприятиях химической, нефтехимической и других отраслей промышленности при разработке и модернизации насадочных контактных аппаратов для проведения процессов контактного теплообмена между газом и жидкостью.

- Разработана и защищена патентом РФ № 2533722 конструкция новой регулярной гофрировано-просечной насадки (ГПН), выполненной из алюминиевой фольги, гофрированной в несколько рядов, сдвинутых друг относительно друга.

- Разработана и защищена патентом РФ № 152293 конструкция контактного насадочного тепломассообменного аппарата.

- Результаты диссертационной работы приняты к использованию на ООО «Каскад» г. Москва.

- Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры инженерной химии и промышленной экологии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» при преподавании дисциплины «Техносферная безопасность».

**Апробация работы.** Основные положения и отдельные результаты докладывались и обсуждались на VII Конкурсе проектов молодых ученых в рамках международной выставки «Химия-2013» (г. Москва, 2013), V Международной конференции Российского химического общества имени Д.И. Менделеева (Москва, 2013), XIX

Международной научно-практической Конференции «Экология промышленных предприятий в свете современных экологических требований: проблемы и решения» (Москва, 2013), третьей Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур» (Москва, 2013), Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2014» (Москва, 2014), XI Международной научно-практической конференции «Экологические проблемы индустриальных мегаполисов» (Москва, 2014), седьмой и восьмой всероссийских конференциях молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2014 и 2015), одиннадцатой всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика)» (Москва, 2015).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 20 работ, из них 6 статей в научно-технических журналах, в том числе 3 в журналах перечня ВАК, 1 статья в зарубежном журнале, 2 патента РФ, 10 тезисов докладов и 1 учебное пособие.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 114 источников и приложений. Объем диссертации составляет 141 страницу, из них 112 страниц текста, 41 рисунок, 3 таблицы, 5 приложений на 15 страницах.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, изложена цель и задачи исследования, научная новизна, практическая ценность, а также основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** кратко рассмотрены существующие конструкции насадок, для проведения процессов тепломассообмена между газом и жидкостью. Показаны направления совершенствования насадочных контактных аппаратов. Выявлено, что в значительной мере интенсивность процессов тепломассообмена зависит от характеристик плёночного течения жидкости по поверхности насадок. Отмечено, что большинство противоточных насадочных устройств, для проведения процессов контактного теплообмена, работают в условиях неполного смачивания, что обусловлено низкой плотностью орошения, что особенно характерно для насадок с высокой удельной поверхностью. Это объясняется тем, что рассчитанный на основе уравнений теплового и материального баланса относительный объемный расход  $\lambda_v = G/L$  представляет собой большую величину ( $700 \div 1000$ ). Так как скорость газа в насадочном аппарате ограничена явлением захлебывания и повышенным уносом, то плотность орошения, как правило, не превышает  $10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ . Между тем, эта плотность орошения недо-

статочна для полного смачивания насадочного слоя с удельной поверхностью более  $50 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Из этого следует, что увеличение энергоэффективности процесса не может быть достигнуто только простым увеличением удельной поверхности насадки.

Для рационального решения проблемы увеличения энергоэффективности процесса, предложена организация перекрёстного тока взаимодействующих потоков газа и жидкости. В условиях перекрёстного течения теплоносителей блок насадки может быть скомпонован таким образом, чтобы сечение для прохода газа было больше сечения для прохода жидкости. Это позволяет добиться максимально полного смачивания слоя насадки и тем самым повысить эффективность процесса.

**Во второй главе** представлено описание конструкции опытных стендов и методик проведения экспериментов. Также представлено описание новой конструкции гофрировано-просечной насадки – ГПН (см. рис. 1). ГПН-насадка представляет собой лист алюминия с выполненными на его поверхности гофрами. Гофры выполнены в несколько рядов, сдвинутых друг относительно друга. За счет сдвига, между соседними гофрами образованы щели (см. рис. 1). Блок предлагаемой насадки представляет собой совокупность из нескольких вертикальных элементов, установленных параллельно друг относительно друга с определенным зазором  $\Delta$  (см. рис. 1в). Основные геометрические характеристики предлагаемой насадки представлены в табл. 1. Для исследования особенностей плёночного течения жидкости по поверхности элемента исследуемой насадки был изготовлен стенд, представленный на рис. 2.

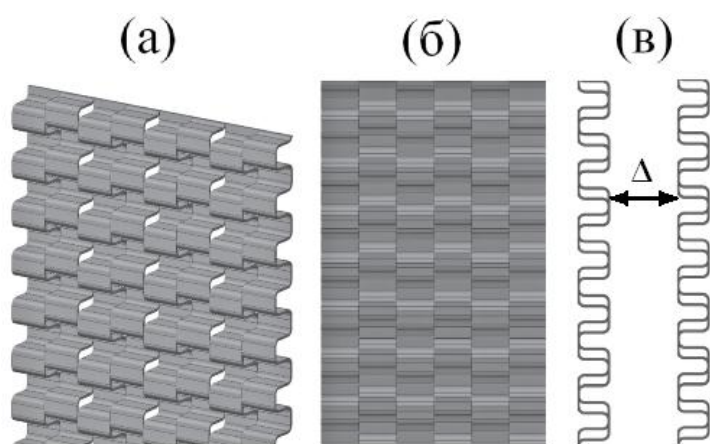


Рис. 1. Элемент ГПН-насадки в изометрии (а); вид на элемент насадки спереди (б); вид сбоку на блок насадки (в)

ними гофрами образованы щели (см. рис. 1). Блок предлагаемой насадки представляет собой совокупность из нескольких вертикальных элементов, установленных параллельно друг относительно друга с определенным зазором  $\Delta$  (см. рис. 1в). Основные геометрические характеристики предлагаемой насадки представлены в табл. 1. Для исследования особенностей плёночного течения жидкости по поверхности элемента исследуемой насадки был изготовлен стенд, представленный на рис. 2.

Табл. 1. Основные геометрические характеристики ГПН-насадки

Зазор между соседними элементами, насадки, мм	Эквивалентный диаметр канала блока насадки, мм	Удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$	Свободный объем насадки, $\text{м}^3/\text{м}^3$
6	8,8	430,1	0,949
10	13	298,4	0,965
14	17	228,6	0,973

Стенд состоит из рамы, в которой вертикально фиксируется элемент ГПН-насадки 1 таким образом, чтобы гофры были ориентированы горизонтально. Жидкость (в опытах использовалась вода) подавалась на верхний торец элемента испыту-

емой насадки через оросительное устройство 2 типа «перфорированная труба». Температура воды в опытах была равна  $7 \div 10$  °С. Для обеспечения подачи орошающей жидкости только на переднюю сторону элемента насадки, к нему был прикреплен дефлектор 3, исключаяющий на начальном этапе орошения попадание жидкости на заднюю сторону элемента насадки. Для обеспечения равномерного плёночного орошения испытуемой насадки и исключения образования брызг, перед дефлектором 3 устанавливалась заслонка 4. Стекающая с элемента насадки по дефлекторам 5 и 6 жидкость собиралась в мерные сосуды 7 и 8. По количеству жидкости в сосуде 7, собираемой с задней стороны элемента насадки, определялось количество жидкости, перетекающей через щели на заднюю сторону элемента насадки. Общий расход орошающей жидкости  $L$  определялся по сумме объемов жидкости в мерных сосудах 7 и 8 в единицу времени. Элемент испытуемой насадки имел размеры 250x60x3 мм.

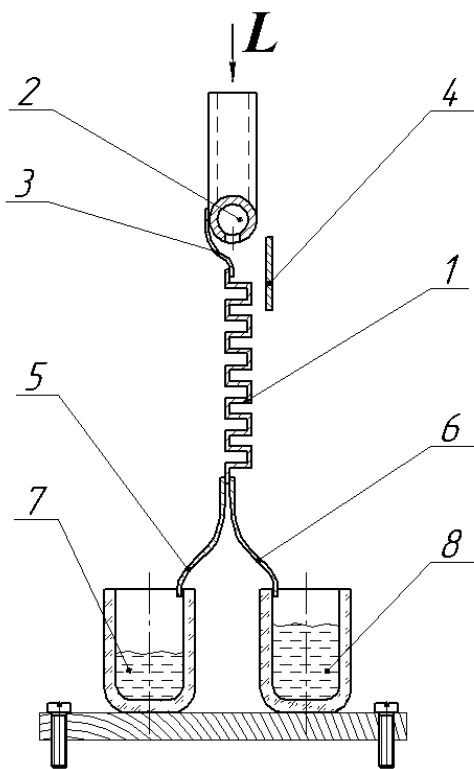


Рис. 2. Схема экспериментального стенда №1 для исследования течения плёнки жидкости по единичному элементу ГПН-насадки

устанавливалась заслонка 4. Стекающая с элемента насадки по дефлекторам 5 и 6 жидкость собиралась в мерные сосуды 7 и 8. По количеству жидкости в сосуде 7, собираемой с задней стороны элемента насадки, определялось количество жидкости, перетекающей через щели на заднюю сторону элемента насадки. Общий расход орошающей жидкости  $L$  определялся по сумме объемов жидкости в мерных сосудах 7 и 8 в единицу времени. Элемент испытуемой насадки имел размеры 250x60x3 мм.

Для проведения процесса контактного теплообмена была разработана конструкция насадочного перекрёстноточного контактного аппарата с данной насадкой, оснащенного плёночным оросительным устройством (Патент РФ 152293). На базе этой конструкции контактного аппарата, для изучения процесса контактного теплообмена по методике испарительного охлаждения, была создана

экспериментальная установка, представленная на рис. 3. Установка работает следующим образом. Центробежный вентилятор 1, производительностью  $1000 \text{ м}^3/\text{час}$  нагнетает воздух по воздуховоду 2 в аппарат 3. Из бака 4 центробежным насосом 5, производительностью до  $6,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ , вода подается в верхнюю часть аппарата 3 на плёночное оросительное устройство. Стекающая с насадки 6 вода возвращается обратно в бак 4. Выходящий из аппарата 3 воздух выбрасывается в атмосферу через воздуховод 7. Расход воздуха в опытах регулировался заслонкой 8. Расход воды регулировался шаровыми кранами 9 и 10. Динамический напор воздуха измерялся с помощью трубки Пито-Прандтля, подключенной к многопозиционному микроманометру ММН-2400 11.

Интенсивность тепло-массообменных процессов определялась путем измерения температуры и влажности воздуха на входе и выходе из насадки (датчики 12 и 13), а также путем измерения температуры воды на плёночном оросительном устройстве (датчик 14) и на выходе из аппарата (датчик 15). В опытах начальная температура воды составляла 39 °С, а параметры атмосферного воздуха на входе в аппарат изменялись от 20 до 25 °С и относительная влажность от 20 до 34%. Подогрев воды до начальной температуры осуществлялся в баке 4 с помощью ТЭНа 16.

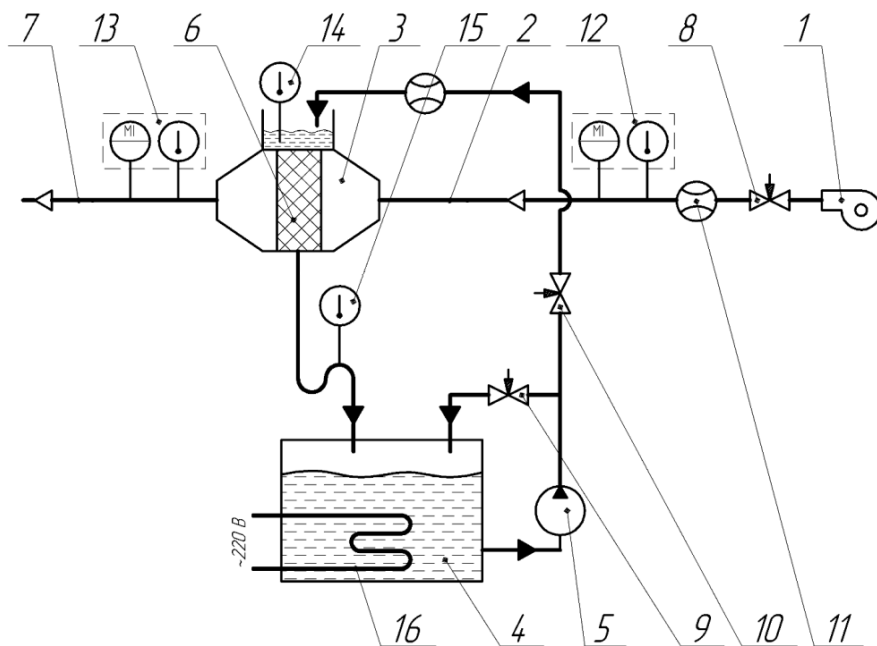


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования тепло- и массообмена на ГПН-насадке (а) и её схема (б)

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований плёночного течения жидкости по поверхности ГПН-насадки на стенде 1. Установлено, что при течении плёнки жидкости по поверхности исследуемой насадки, имеет место перетекание жидкости с одной стороны элемента насадки на другую. На рис. 4а и рис. 4б пока-

заны результаты экспериментальных исследований по определению количества жидкости, перетекающей с одной стороны элемента насадки на другую через щели в поверхности элемента насадки. Для анализа интенсивности перетекания жидкости с одной стороны элемента насадки на другую удобно использовать безразмерный симплекс, равный отношению количества жидкости, перетекающей через щели в насадке в единицу времени к общему расходу орошающей жидкости, или что то же самое отношению  $\Gamma_3/\Gamma$  (см. рис. 4б). Из анализа кривых на рис 4 можно сделать вывод, что явление перетекания наступает скачкообразно, при достижении определенной величины плотности орошения (при  $Re_{пл} \approx 1320$ ). При меньших плотностях орошения (при  $Re_{пл} < 1320$ ), жидкость от перетекания с одной стороны элемента насадки (передней) на другую сторону элемента насадки (заднюю) удерживают капиллярные силы. Это было визуально установлено по наличию менисков жидкости в щелях, с задней стороны элемента насадки. Перетекание жидкости на заднюю сторону элемента насадки



связано с продавливанием жидкости через щели со стороны стекающей плёнки жидкости. Это явление возникает при появлении в стекающей плёнке жидкости турбулентности.

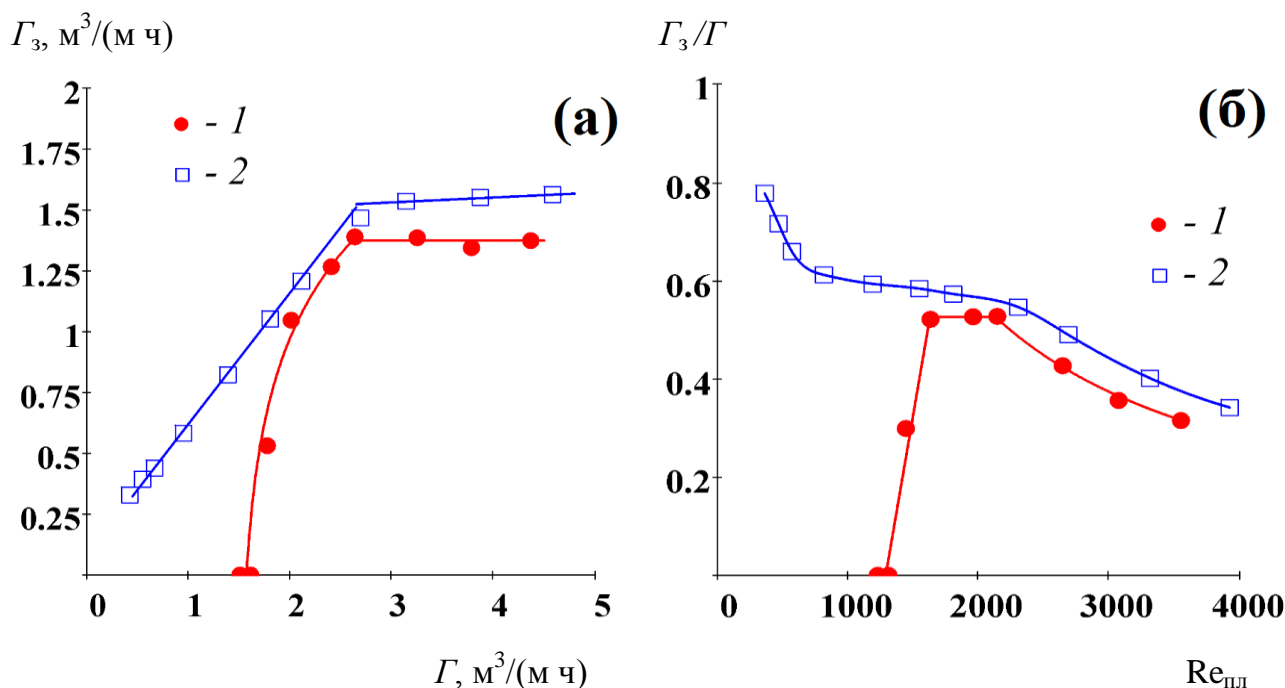


Рис. 4. Зависимость количества жидкости, перетекающей на противоположную сторону насадки через щели от расхода жидкости. 1 – Серия экспериментов при постепенном увеличении плотности орошения; 2 – серия экспериментов при постепенном уменьшении плотности орошения

В результате наблюдений за перетеканием жидкости с одной стороны элемента насадки на другую было установлено, что механизм перетекания жидкости состоит из шести стадий, представленных на рис. 5. При значениях плёночного числа Рейнольдса  $Re_{nл} < 1320$ , на задней стороне насадки в местах щелей наблюдаются мениски жидкости и переток жидкости на заднюю сторону элемента насадки отсутствует. (рис. 5а). При возникновении в плёнке жидкости турбулентности (при  $Re_{nл} > 1320$ ), возникают значительные поперечные флуктуации вектора скорости в стекающей плёнке жидкости. Это приводит к периодическим увеличениям динамического давления на мениски жидкости в щелях со стороны стекающей плёнки жидкости. В результате, мениск жидкости в одной из щелей (или в нескольких) продавливается, и жидкость через эту щель начинает перетекать на заднюю сторону элемента насадки, образуя растущую в объеме каплю (рис. 5б.). В результате увеличения объема капли, она схватывается с мениском жидкости в соседней щели (рис. 5в), что приводит к увеличению количества жидкости, перетекающей на заднюю сторону элемента насадки. Перетекающая жидкость образует струю, стекающую на нижележащие впадины гофр (рис. 5г). Схватываясь с менисками жидкости в нижележащих щелях (рис. 5д), струя интенсифицирует перетекание жидкости на заднюю сторону элемента насадки. В ре-

зультате увеличения количества жидкости, перетекающей на заднюю сторону элемента насадки на каждой нижележащей впадине гофр, струя расширяется и превращается в плёнку (рис. 5е), ширина которой увеличивается при стекании на нижележащие впадины гофр, за счет дальнейшего подсосывания жидкости через нижележащие щели, оказывающиеся под фронтом перетекающей на заднюю сторону насадки плёнки жидкости.

Эксперименты, проведенные при последовательном уменьшении плотности орошения (кривые 2 на рис. 4а и рис. 4б) показывают, что направление изменения расхода жидкости незначительно влияет на зависимость  $\Gamma_3/\Gamma = f(\text{Re}_{\text{пл}})$  при  $\text{Re}_{\text{пл}} > 1650$ .

При меньших значениях расхода жидкости, можно наблюдать, что с уменьшением плотности орошения продолжает увеличиваться отношение  $\Gamma_3/\Gamma$  (см. рис. 4б). Таким образом, при  $\text{Re}_{\text{пл}} < 1650$  количество жидкости, перетекающей через щели, зависит от предварительного смачивания поверхности насадки. Результаты экспериментов с единичным элементом насадки позволили прийти к выводу, что при плотностях орошения, соответствующих  $\text{Re}_{\text{пл}} > 1500$ , вся поверхность насадки оказывается гарантированно смоченной, даже при подаче орошающей жидкости лишь на одну сторону элемента насадки.

**В четвертой главе** приведены результаты исследования теплообмена в блоке ГПН-насадки при перекрёстном режиме течения воздуха и воды. Результаты

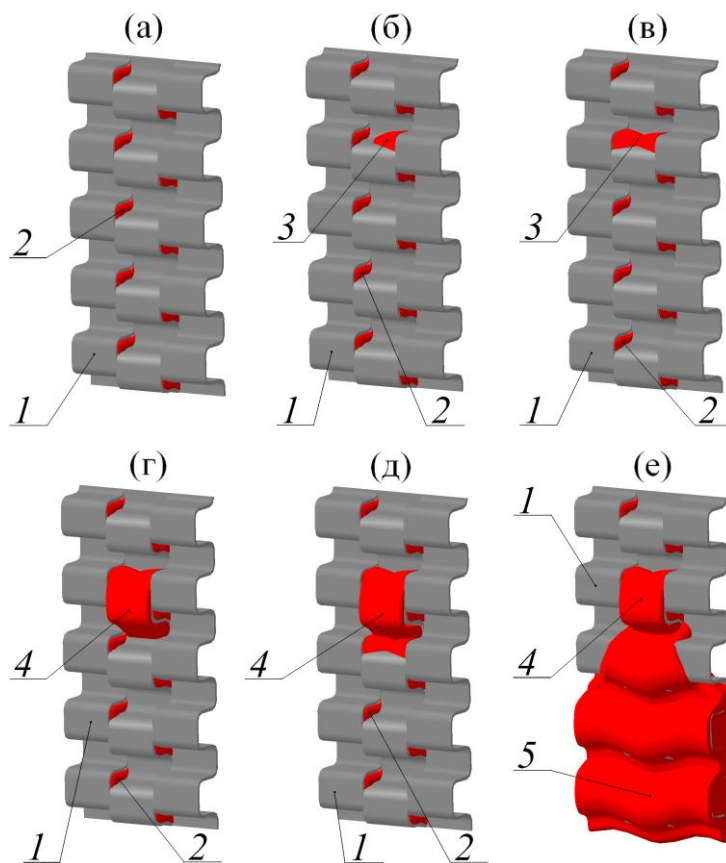


Рис. 5. Стадии механизма перетекания жидкости на заднюю сторону элемента насадки: (а) – исходное состояние; (б) – продавливание мениска жидкости и образование капли на задней стороне элемента насадки; (в) – увеличение объема капли и схватывание её с мениском жидкости в соседней щели; (г) – увеличение объема капли и стекание её единичной струей на заднюю сторону элемента насадки; (д) – схватывание струи жидкости с менисками жидкости в щелях нижележащей впадины гофры; (е) образование плёнки и гравитационное стекание её вниз. 1 – Элемент насадки; 2 – мениск жидкости в щели; 3 – капля жидкости; 4 – струя жидкости; 5 – плёнка жидкости

представлены на графиках в виде зависимости критерия Шервуда от критерия Рейнольдса газа (рис. 6) и от плёночного числа Рейнольдса (рис. 7). Из графиков можно видеть, что с увеличением скорости газа до значений числа Рейнольдса газа около 2500, расход жидкости практически не влияет на коэффициент массоотдачи на исследуемой насадке. При больших значениях критерия Рейнольдса газа наблюдается сложная картина зависимости интенсивности тепломассообмена на исследуемой насадке от расходов теплоносителей. Увеличение коэффициента массоотдачи за счет возникновения турбулентности в газовом потоке соседствует с явлением уменьшения коэффициента массоотдачи за счет сноса жидкости с поверхности элементов насадки потоком газа. Последнее приводит к обнажению сухих пятен на насадке и как следствие к уменьшению активной поверхности тепломассообмена.

Результаты экспериментов были также обработаны по методике градири, с получением зависимости  $\beta_v/q = f(G/L)$ . Для переходного режима течения (при  $Re_r < 2500$ ), результаты представлены на рис. 8. Из графика видно, что с уменьшением плотности орошения увеличивается интенсивность процесса тепломассообмена, выражаемая в данном случае отношением  $\beta_v/q$ . В то же время для большинства других насадок градирен зависимость  $\beta_v/q$  представляет собой одну прямую. Было проведено

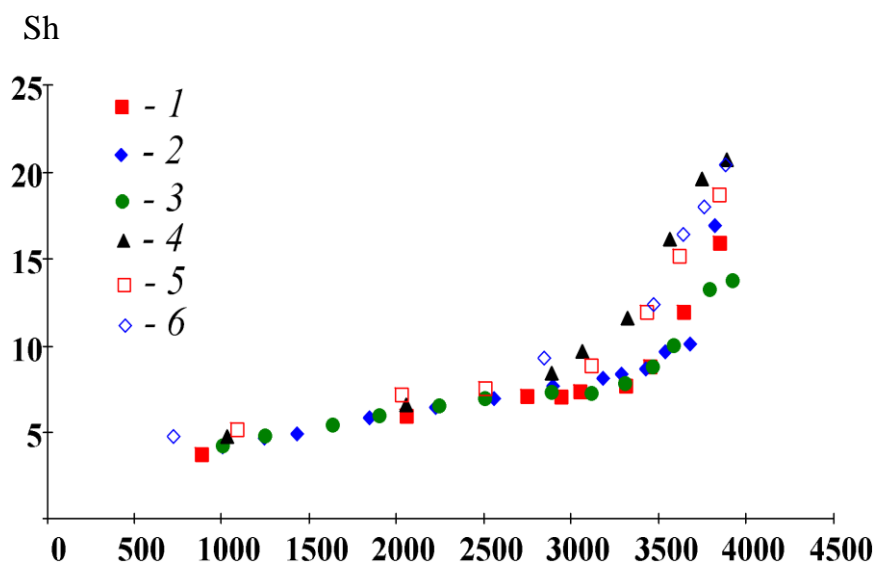


Рис. 6. Зависимость критерия Шервуда от критерия Рейнольдса газа при длине блока насадки  $l = 100$  мм и зазоре между элементами насадки  $\Delta = 14$  мм. 1 –  $Re_{пл} = 321$ ,  $q = 19 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$ ; 2 –  $Re_{пл} = 683$ ,  $q = 40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$ ; 3 –  $Re_{пл} = 1037$ ,  $q = 60 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$ ; 4 –  $Re_{пл} = 1566$ ,  $q = 92 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$ ; 5 –  $Re_{пл} = 1917$ ,  $q = 112 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$ ; 6 –  $Re_{пл} = 3321$ ,  $q = 194 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$

несколько серий опытов при различной начальной температуре воды, изменяющейся в диапазоне от 25 до 45 °С. Эксперименты показали, что с увеличением температуры воды, уменьшается значение коэффициента массоотдачи на данной насадке. При проведении экспериментов с другими размерами блока насадки (длиной  $l_{нас}$  и зазором между элементами насадки  $\Delta$ ), было установлено, что интенсивность тепломассообмена увеличивается с увели-

чением зазора между элементами насадки и уменьшением длины блока насадки (см. рис. 9). В результате обработки экспериментальных данных получено критериальное уравнение для расчета значения коэффициента массоотдачи на ГПН-насадке:

$$\text{Sh} = 0,24 \text{Re}_r^{0,67} \left(\frac{\Delta}{l}\right)^{0,62} \left(\frac{T_r}{T_{\text{ж}}}\right)^{0,57} \text{Sc}^{0,33} \quad (1)$$

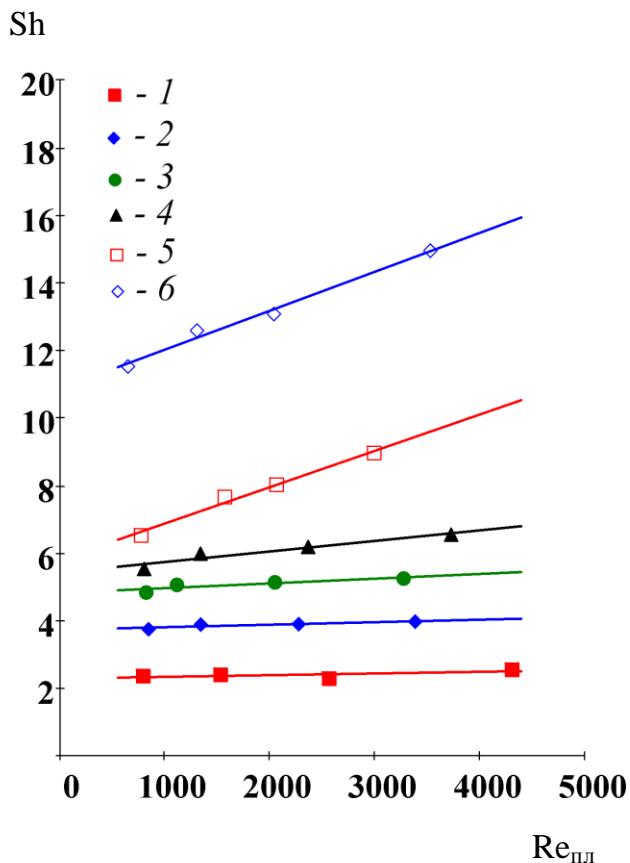


Рис. 7. Зависимость критерия Шервуда от плёночного числа Рейнольдса при длине блока насадки  $l = 100$  мм и зазоре между элементами насадки  $\Delta = 14$  мм. 1 –  $\text{Re}_r = 510$ ,  $w = 0,51$  м/с; 2 –  $\text{Re}_r = 1289$ ,  $w = 1,3$  м/с; 3 –  $\text{Re}_r = 1947$ ,  $w = 1,96$  м/с; 4 –  $\text{Re}_r = 2645$ ,  $w = 2,66$  м/с; 5 –  $\text{Re}_r = 3178$ ,  $w = 3,19$  м/с; 6 –  $\text{Re}_r = 3646$ ,  $w = 3,63$  м/с

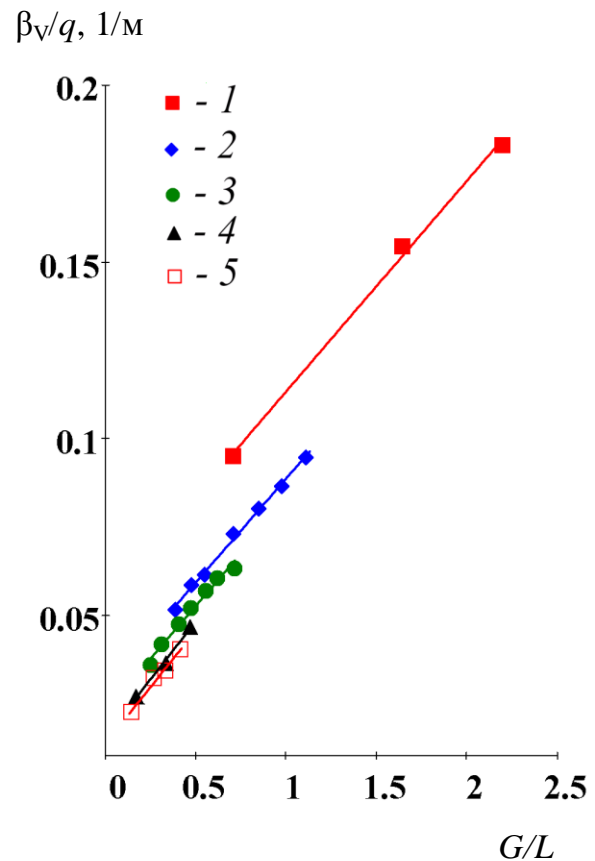


Рис. 8. Зависимость  $\beta_V/q_{\text{ж}} = f(\lambda_m)$  при длине блока насадки  $l = 100$  мм и зазоре между элементами насадки  $\Delta = 14$  мм. 1 –  $q = 19$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час); 2 –  $q = 40$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час); 3 –  $q = 60$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час); 4 –  $q = 92$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час); 5 –  $q = 112$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час);

Для сравнения эффективности тепломассообмена на ГПН-насадке с известными ранее конструкциями насадок, было проведено несколько аналогичных серий опытов на плоскопараллельной насадке (далее ППН). ППН-насадка выполнялась из листового алюминиевого сплава АМг3, толщиной 3 мм, что соответствует толщине элемента ГПН-насадки, участвовавшей в опытах. Результаты экспериментов представлены на рис. 10 в виде зависимости критерия Шервуда от F-фактора. Из графика

видно, что ГПН-насадка (линия 5) обладает более высокой эффективностью по сравнению с ППН-насадкой. Из анализа кривых на рис. 10 также можно сделать вывод, что по сравнению с ППН-насадкой, ГПН-насадка лучше смачивается водой. Это следует из значительного влияния плотности орошения на коэффициент массоотдачи для ППН-насадки.

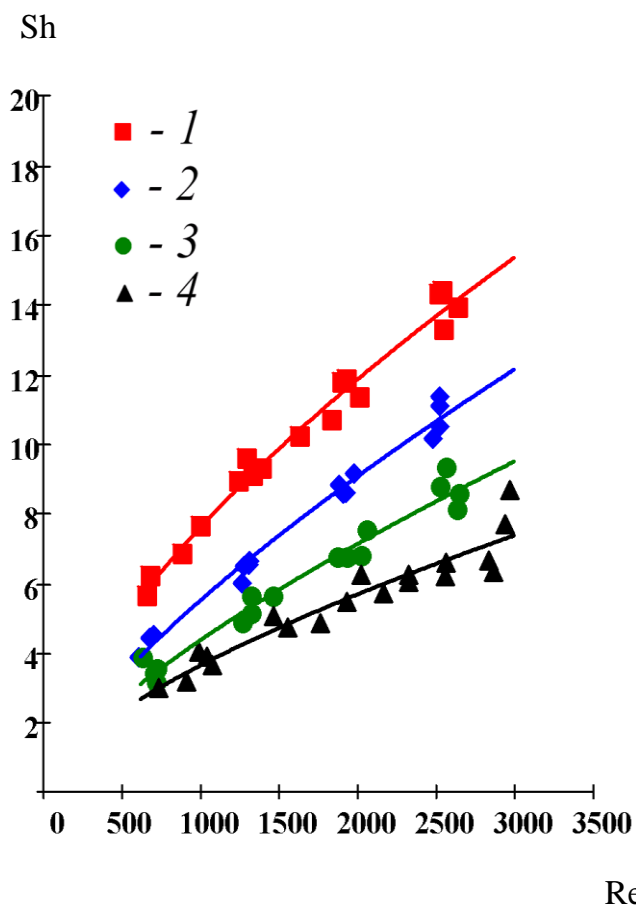


Рис. 9. Зависимость критерия Шервуда от критерия Рейнольдса газа при различной длине блока насадки  $l_{\text{нас}}$  и зазоре между элементами насадки  $\Delta = 17$  мм. 1 –  $l_{\text{нас}} = 52$  мм; 2 –  $l_{\text{нас}} = 100$  мм; 3 –  $l_{\text{нас}} = 150$  мм; 4 –  $l_{\text{нас}} = 200$  мм

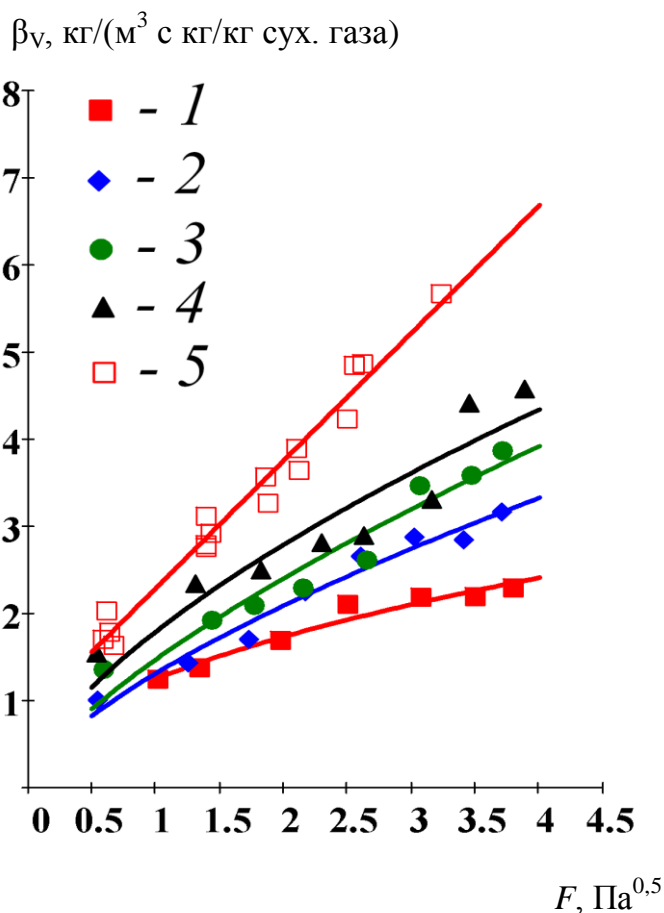


Рис. 10. Зависимость коэффициента массоотдачи от F-фактора при длине блока насадки  $l = 100$  мм и зазоре между элементами насадки  $\Delta = 14$  мм на ППН насадке. 1 –  $Re_{\text{пл}} = 410$ ,  $q = 28$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час); 2 –  $Re_{\text{пл}} = 866$ ,  $q = 59$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час); 3 –  $Re_{\text{пл}} = 1374$ ,  $q = 94$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час); 4 –  $Re_{\text{пл}} = 1606$ ,  $q = 110$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> час); 5 – ГПН-насадка,  $880 < Re_{\text{пл}} < 2400$

**В пятой главе** представлена методика расчета контактного аппарата с ГПН-насадкой на примере градирни. Расчет производится по следующей схеме (см. табл. 2). Исходными данными для расчета градирни, являются расход жидкости (воды), а также её начальная и конечная температура.

Табл.2. Методика расчета контактного аппарата с ГПН-насадкой на примере градирни

1. Принимаем величину зазора между элементами насадки $\Delta$ , фиктивную скорость газа $w$ и плёночное число Рейнольдса $Re_{пл}$ . В первом приближении задаемся температурой и влажностью газа на выходе из градирни	
2. Принимаем длину блока насадки $l$ . Определяем количество элементов насадки по ширине аппарата: $n = \frac{L}{2\Gamma \cdot l}$ и ширину блока насадки: $b = n(\Delta + \delta) + \Delta$	2. Принимаем ширину блока насадки $b$ . Определяем количество элементов насадки по ширине аппарата: $n = \frac{b - \Delta}{\Delta + \delta}$ и длину блока насадки: $l = \frac{L}{2n \cdot \Gamma}$
3. Из теплового баланса находим количество переданного тепла в градирне $Q_{ж}$ , в первом приближении полагая, что испаряется 1% жидкости: $Q_{ж} = C_{ж} \cdot \rho_{ж} \left[ \frac{L}{3600} (T_{ж}' - T_{ж}'' ) + L_{исп} \cdot T_{ж}'' \right]$	
4. Определяем поверхностный коэффициент массоотдачи по уравнению (1):	
5. Определяем поверхностный коэффициент теплоотдачи по соотношению Льюиса: $\alpha = \beta_f \cdot C_{\Gamma}$	
6. Находим удельную тепловую мощность по уравнениям: $q = \alpha \cdot \Delta T + \beta_f \cdot r \cdot \Delta X$	
7. Находим объем насадки: $V = \frac{Q_{ж}}{q}$ и высоту блоку насадки: $h = \frac{V}{l \cdot b}$	
8. Определяем расход газа: $G = w_0 \cdot h \cdot b$	
9. Находим количество испарившейся жидкости $L_{исп}$ и влагосодержание газа на выходе из аппарата $X''$ решив систему уравнений: $L_{исп} \cdot \rho_{ж} = \frac{G}{3600} (X'' - X')$ и $\Delta X = \frac{L_{исп} \cdot \rho_{ж}}{a \cdot V \cdot \beta_f}$	
10. Определяем количество переданного тепла в аппарате по уравнению: $Q_{\Gamma} = \frac{G}{3600} (i'' - i')$	
11. Проверяем сходимость теплового баланса: $E = \frac{Q_{ж} - Q_{\Gamma}}{Q_{\Gamma}}$	
12. Если $E < 5\%$ , то оцениваем полученную высоту насадки $h$ .	12. Если $E > 5\%$ , то находим температуру газа на выходе из аппарата:

		$T_{г}'' = \frac{q_{г} \cdot V + G \cdot \rho_{г} \cdot C_{г} \cdot T_{г}'}{G \cdot \rho_{г} \cdot C_{г}}$
Если $h$ удовлетворяет по конструктивным соображениям, то расчет окончен	Если $h$ не удовлетворяет по конструктивным соображениям, то возвращаемся к п. 1	С полученными в п. 9 и п. 12 конечным влагосодержанием и температурой газа, а также количеством испарившейся жидкости возвращаемся к п. 3.

В результате расчетов по предлагаемой методике можно определить требуемый объем насадки, а также расход газа. Значения  $Re_{пл}$  предлагается выбирать в диапазоне  $1650 < Re_{пл} < 2200$ , что соответствует максимальным значениям соотношения  $G_3/G$  (см. рис. 4б). Это позволяет обеспечить наиболее равномерное смачивание насадки.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что при течении плёнки жидкости по ГПН-насадке имеет место перетекание жидкости с одной стороны элементов насадки на другую через щели. Отмечено, что перетекание жидкости с одной стороны элемента насадки на другую нарастает лавинообразно при появлении в стекающей плёнке жидкости турбулентности, а также зависит от направления изменения расхода жидкости.

2. Экспериментально установлено влияние плотности орошения на интенсивность перетекания жидкости с одной стороны элементов насадки на другую.

3. Проведены тепломассообменные испытания блока ГПН-насадки в условиях перекрёстного тока. Изучено влияние на интенсивность тепломассообмена на ГПН-насадке зазора между элементами насадки, длины блока насадки, температур газа и жидкости, скорости газа и плотности орошения жидкости, а также их теплофизических свойств. Установлен диапазон устойчивой работы исследуемой насадки в условиях перекрёстного тока взаимодействующих потоков газа и жидкости. Получено критериальное уравнение для определения коэффициента массоотдачи в газовой фазе при испарительном охлаждении.

4. Экспериментально установлено, что ГПН-насадка обладает более высокой эффективностью по сравнению с плоскопараллельной насадкой и позволяет обеспечить при скорости газа 2,5 м/с интенсификацию процесса тепломассообмена в 1,5 – 2,5 раза в диапазоне  $Re_{пл}$  от 410 до 1606 соответственно.

5. Разработана конструкция насадочного тепломассообменного аппарата с ГПН-насадкой

6. Разработана методика расчета контактного теплообменного аппарата с ГПН-насадкой.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. **Городилов А. А., Пушнов А. С., Беренгартен М. Г. Совершенствование конструкции хордовой насадки // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. - №2. – С. 10-13.**

2. **Городилов А.А., Пушнов А.С., Беренгартен М.Г. Методы интенсификации процессов тепло- и массообмена в регулярных насадках // Энергосбережение и водоподготовка. – 2014. – №3(89). – С. 45-51.**

3. **Пушнов А.С., Городилов А.А., Беренгартен М.Г. Гидродинамика растекания струи жидкости по гофрированной поверхности регулярной насадки с просечными элементами // Химическая технология. – 2014. – №6(15). – С. 364-370.**

4. **Регулярная насадка для тепло- и массообменных аппаратов: пат. RU 2533722 С1, МПК В01J 19/32 / Беренгартен М.Г., Пушнов А.С., Городилов А.А.; Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)». – № 2013142009; заявл. 16.09.2013; опубл. 20.11.2014, Бюл. №32 – 2 С.: ил.**

5. **Горизонтальный насадочный теплообменный аппарат: пат. RU 152293 U1, МПК F28C3/00 / Городилов А.А., Пушнов А.С., Беренгартен М.Г.; Заявитель и патентообладатель Городилов А.А. – № 2014128250; заявл. 10.07.2014; опубл. 20.05.2015, Бюл. №15 – 2 с.: ил.**

6. **Gorodilov A.A., Pushnov A.S., Berengarten M.G. Spreading of a fluid jet on the corrugated surface of the structured packing of wet scrubbers // Problemele energeticii regionale. – 2014. – №2(25). – P. 49-62.**

7. **Беренгартен М.Г., Витковская Р.Ф., Городилов А.А., Пушнов А.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Насадочные скрубберы для контактного теплообмена: учеб. пособие. – СПб.: ФГБОУВПО «СПГУТД», 2014. – 82 с.**

8. **Городилов А., Пушнов А., Беренгартен М. Растекание струи жидкости по поверхности элемента регулярной просечной насадки для осуществления процессов тепло- и массообмена // ŠILUMOS ENERGETIKA IR TECHNOLOGIJOS: тезисы докладов. – Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 2013. – С. 103-106.**

9. **Городилов А.А., Беренгартен М.Г. Компьютерное моделирование гидродинамики регулярных насадок // Конкурс проектов молодых ученых: тезисы докладов. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013. – С. 13-14.**

10. **Городилов А.А., Беренгартен М.Г. Компьютерное моделирование гидродинамики регулярных насадок // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической**



и нефтехимической промышленности. V Международная конференция Российского химического общества им. Д. И. Менделеева: тезисы докладов. – М.: РХО им. Д. И. Менделеева: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2013. – С. 195-196.

11. Городилов А.А. Режимы гравитационного течения плёнки жидкости по регулярной гофрировано-просечной насадке смесительного теплообменника. // Сборник научных трудов III международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур», М.: Университет машиностроения, 2014, С. 141-144.

12. Городилов А.А. Регулярная насадка для тепло- и массообменных процессов // Нефть и газ 2014: сборник тезисов. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2014. – С. 29.

13. Городилов А.А. Универсальная регулярная насадка для проведения тепло- и массообменных процессов в природоохранном оборудовании // III Всероссийская молодежная научная конференция «Естественнонаучные основы теории и методов защит биокружающей среды»: тезисы докладов, СПб: СПбГУКиТ, 2014, С. 42-43.

14. Городилов А. А. Влияние перфорации насадок для градилен на активную поверхность тепломассообмена [Электронный ресурс] / А. А. Городилов. — Москва: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014. — 7 с. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Седьмая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» электронный сборник трудов.

15. Городилов А.А. Влияние перфорации насадок для градилен на активную поверхность тепломассообмена // Будущее машиностроения России: сборник трудов Седьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов, М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, С. 232-233.

16. Городилов А.А., Беренгартен М.Г. Особенности контактного теплообмена в щелевых каналах поперечноточных градилен // Восьмая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» : сборник докладов / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, с. 606-609.

17. Городилов А.А. Энергосбережение при утилизации продуктов сгорания природного газа // Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика): тезисы докладов. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015. – С. 472.

18. Городилов А. А., Пушнов А. С., Беренгартен М. Г. Об эффективности процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах с регулярной насадкой // Химическая техника. – 2013. – №6. – С. 39-42.

19. Пушнов А. С., Городилов А. А., Беренгартен М. Г. Конструктивные характеристики регулярных насадок и их влияние на эффективность процесса испарительного охлаждения оборотной воды в градирнях // Энциклопедия инженера-химика. – 2013. – №12. – С. 29-46.

20. Городилов А., Беренгартен М. Моделирование процессов // Химия и бизнес. – 2013. – №7-8. – С. 50-51.

### Условные обозначения

$a$  – удельная поверхность насадки,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $b$  – ширина блока насадки, м;  $C$  – теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг} \text{ } ^\circ\text{C})$ ;  $d$  – эквивалентный диаметр канала блока насадки, м;  $E$  – относительная погрешность;  $F$  – F-фактор,  $\text{Па}^{0.5}$ ;  $G$  – объемный расход газа,  $\text{м}^3/\text{час}$ ;  $h$  – высота блока насадки, м;  $i$  – энтальпия газа,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $L$  – объемный расход жидкости,  $\text{м}^3/\text{час}$ ;  $L_{\text{исп}}$  – количество испаряющейся в аппарате жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $l$  – длина элемента насадки, м;  $n$  – количество элементов насадки по ширине аппарата;  $Q$  – тепловая нагрузка аппарата, рассчитанная по параметрам одного из теплоносителей, Вт;  $q$  – удельное количество передаваемого тепла,  $\text{Вт}/\text{м}^3$  или плотность орошения,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$  или  $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$ ;  $T$  – температура теплоносителя,  $^\circ\text{C}$ ;  $V$  – объем насадки,  $\text{м}^3$ ;  $w$  – фиктивная скорость газа, м/с;  $X$  – влагосодержание газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$  сух. газа;  $\Gamma$  – линейная плотность орошения,  $\text{м}^3/(\text{м} \text{ час})$ ;  $\Gamma_3$  – количество жидкости, перетекающее через щели на заднюю сторону элемента насадки в единицу времени, отнесенное к ширине плёнки жидкости,  $\text{м}^3/(\text{м} \text{ ч})$ ;  $\alpha$  – поверхностный коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ ;  $\beta_f$  – поверхностный коэффициент массоотдачи, м/с;  $\beta_v$  – коэффициент массоотдачи,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \text{ с} \text{ кг}/\text{кг} \text{ сух. газа})$ ;  $\Delta$  – зазор между соседними элементами насадки, м;  $\delta$  – толщина элемента насадки, м;  $\lambda$  – относительный расход теплоносителей;  $\Delta T$  – среднелогарифмическая разность температур газа и жидкости,  $^\circ\text{C}$ ;  $\Delta X$  – среднелогарифмическая разность влагосодержаний газа в ядре потока и над поверхностью плёнки жидкости,  $\text{кг}/\text{кг}$  сухого газа;  $\varepsilon$  – свободный объем насадки,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $\rho$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\text{Re}_f$  – критерий Рейнольдса газового потока в слое насадки;  $\text{Re}_{\text{пл}}$  – плёночное число Рейнольдса;  $\text{Sc}$  – критерий Шмидта (диффузионное число Прандтля);  $\text{Sh}$  – критерий Шервуда (диффузионное число Нуссельта);

ИНДЕКСЫ: ...<sub>ж</sub> – жидкость; ...<sub>г</sub> – газ; ...<sub>кр</sub> – критическое значение; ...<sub>v</sub> – объемный; ...<sub>m</sub> – массовый; ... ' – значение величины на входе в аппарат; ... " – значение величины на выходе из аппарата.