

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
„Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)“

На правах рукописи

Городилов Александр Андреевич

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА
ТЕПЛОМАССОБМЕНА В КОНТАКТНЫХ
АППАРАТАХ С РЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКОЙ**

05.17.08 – Процессы и аппараты химической технологии

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

кандидат химических наук, профессор

Беренгартен М.Г.

Москва – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. ГАЗОЖИДКОСТНЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА (ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР)	11
1.1. Типы газожидкостных контактных аппаратов с насадкой	11
1.2. Виды насадок и их основные характеристики	12
1.3. Конструктивные способы интенсификации процессов контактного теплообмена на регулярных насадках	20
1.4. Особенности гидродинамики плёночных регулярных насадок	27
1.4.1. <i>Течение плёнки жидкости по гладким вертикальным и наклонным поверхностям</i>	28
1.4.2. <i>Течение плёнки жидкости по насадкам и поверхностям с комплексной геометрией</i>	32
1.5. Особенности контактного теплообмена между газом и жидкостью на насадках	41
1.5.1. <i>Массообмен в процессе контактного теплообмена</i>	42
1.5.2. <i>Коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи</i>	43
1.6. Выводы из обзора литературы	47
1.7. Постановка задач исследования	50
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ГОФРИРОВАННО-ПРОСЕЧНОЙ НАСАДКИ	51
2.1. Конструкция и характеристики новой регулярной гофрированно-просечной насадки	51
2.2. Экспериментальный стенд №1 для исследования течения плёнки жидкости по единичному элементу гофрированно-	53

просечной насадки	
2.3. Экспериментальная установка №2 для исследования теплообмена в блоке гофрировано-просечной насадки	55
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ПЛЁНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ГОФРИРОВАНО-ПРОСЕЧНОЙ НАСАДКИ	62
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ БЛОКА РЕГУЛЯРНОЙ ГОФРИРОВАНО- ПРОСЕЧНОЙ НАСАДКИ	75
4.1. Методика обработки результатов эксперимента	75
4.2. Результаты экспериментальных исследований	78
4.3. Результаты сравнительных испытаний ГПН-насадки с другими конструкциями насадок	89
ГЛАВА 5. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНТАКТНОГО АППАРАТА С ГОФРИРОВАННО-ПРОСЕЧНОЙ НАСАДКОЙ	100
5.1. Исходные данные	100
5.2. Выбор скорости газа и линейной плотности орошения	100
5.3. Определение объема насадочной части аппарата	102
5.4. Проверка сходимости теплового баланса	108
5.5. Определение объемной плотности орошения	109
5.6. Определение мощности вентилятора	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	112
ЛИТЕРАТУРА	113
ПРИЛОЖЕНИЯ	127
Приложение 1. Экспериментальные данные по массообмену	127
Приложение 2. Акт о внедрении результатов работы на ООО «Каскад»	137
Приложение 3. Акт о внедрении результатов работы в ФГБОУ ВО СПбГУПТД	138
Приложение 4. Патент РФ «Регулярная насадка для тепло- и	140

массообменных аппаратов»

Приложение 5. Патент РФ «Горизонтальный насадочный
теплообменник». 141

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- A – постоянный множитель в уравнении; амплитуда волн, м;
- a – удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$;
- b – ширина элемента насадки, м;
- C – теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$;
- c – толщина элемента насадки, м; теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$;
- D – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе, $\text{м}^2/\text{с}$;
- d – диаметр, м;
- E – относительная погрешность;
- F – F-фактор, $\text{Па}^{0.5}$; площадь сечения аппарата в плане, м^2 ;
- f – площадь поверхности, м^2 ;
- G – массовый расход газа, $\text{кг}/\text{с}$;
- g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;
- H – число перетока;
- h – высота, м;
- I – энтальпия газа, $\text{Дж}/\text{кг}$;
- L – объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$;
- $L_{\text{исп}}$ – количество жидкости, испаряющееся на насадке в единицу времени, $\text{м}^3/\text{с}$;
- l – длина, м;
- m – показатель степени в уравнении;
- n – количество элементов насадки по ширине аппарата;
- Q – тепловая нагрузка аппарата, Вт;
- q – удельное количество передаваемой теплоты, $\text{Вт}/\text{м}^3$; объемная плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$;
- r – скрытая теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$,
- s – расстояние между соседними выступами шероховатости, м;
- S – расстояние между соседними отверстиями в оросительном устройстве, м;

- T – температура теплоносителя, °С;
- V – объем насадки, м³;
- w – фиктивная скорость газа, м/с;
- X – влагосодержание газа, кг/м³;
- Γ – линейная плотность орошения, м³/(м·с);
- Γ_3 – количество жидкости, перетекающее через щели на заднюю сторону элемента насадки в единицу времени, отнесенное к ширине плёнки жидкости, м³/(м·с);
- Π – смоченный периметр, м;
- α – поверхностный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С);
- β_f – поверхностный коэффициент массоотдачи, м/с;
- β_v – объемный коэффициент массоотдачи, кг/(м³·с·кг/кг сух. газа);
- Δ – зазор между соседними элементами насадки, м;
- ΔP – гидравлическое сопротивление насадки, Па;
- ΔT – среднелогарифмическая разность температур газа и жидкости, °С;
- ΔX – среднелогарифмическая разность влагосодержаний газа в ядре потока и над поверхностью плёнки жидкости, кг/м³;
- δ – толщина плёнки жидкости, м;
- ψ – поправочный коэффициент в уравнении движущей силы массообмена;
- Ω – поправочный коэффициент в уравнении движущей силы теплообмена;
- ε – удельный свободный объем насадки, м³/м³;
- μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с;
- ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;
- ξ – коэффициент гидравлического сопротивления насадки;
- ρ – плотность, кг/м³;
- λ – относительный объемный расход; длина волны, м;
- Φ – коэффициент смачивания;
- Fi – Плёночное число (Число Капицы);
- Ki – критерий Кирпичева;
- Ku – критерий Кутателадзе (критерий фазового перехода);

Le – критерий Льюиса;

Me – критерий Меркеля;

Re_G – критерий Рейнольдса газового потока в слое насадки;

Re_L – критерий Рейнольдса жидкости;

$Re_{пл}$ – плёночное число Рейнольдса;

$Re_{кр}$ – критическое значение плёночного числа Рейнольдса, соответствующее переходу от ламинарного режима течения к турбулентному;

Sc – критерий Шмидта (диффузионное число Прандтля);

Sh – критерий Шервуда (диффузионное число Нуссельта) рассчитанный по эквивалентному диаметру канала блока насадки;

Sh_{Δ} – критерий Шервуда (диффузионное число Нуссельта) рассчитанный по зазору между соседними элементами насадки;

St – диффузионное число Стантона (Критерий Маргулиса);

We – критерий Вебера.

Индексы:

\dots_e – эквивалентный; \dots_{max} – максимальная; \dots_{min} – минимальная; \dots_p – выступов гофр; \dots_v – впадин гофр; \dots_G – газ; $\dots_{гф}$ – гофр; \dots_L – жидкость; $\dots_{дейст}$ – действительное значение; $\dots_{кр}$ – критическое значение; \dots_n – насыщенного газа; $\dots_{нас}$ – насадки; \dots_o – отверстий; $\dots_{пар}$ – пар; $\dots_{п}$ – паза на оросительном устройстве; $\dots_{ш}$ – выступов регулярной шероховатости; \dots_T – за счет теплообмена; \dots_M – за счет массообмена; \dots' – значение величины на входе в аппарат; \dots'' – значение величины на выходе из аппарата.

Сокращения:

ГПН – гофрировано-просечная насадка;

ППН – плоскопараллельная насадка;

ТМО – теплообмен;

ВВЕДЕНИЕ

Процессы тепломассообмена между газом и жидкостью находят широкое распространение в химической, нефтеперерабатывающей промышленности, энергетике и т.д. Значительный интерес представляет процесс передачи теплоты между газом и жидкостью при их непосредственном соприкосновении. Наиболее интенсивно процессы теплообмена между газовой и жидкой фазами протекают при непосредственном соприкосновении теплоносителей (контактном теплообмене) 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 насадки с гофрировано-просечной поверхностью.

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 др. 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 теплообменного 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-Петербургского государственного университета 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 всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2014 и 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.

ГЛАВА 1. ГАЗОЖИДКОСТНЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА

1.1. Типы газожидкостных контактных аппаратов с насадкой

Газожидкостные контактные аппараты с насадкой используются в различных технологических процессах химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, криогенной, пищевой и др. отраслях промышленности. Среди них газожидкостные химические реакторы, аппараты для проведения процессов абсорбции, десорбции и хемосорбции, ректификационные колонны и другие аппараты. Для интенсивной передачи теплоты между газом и жидкостью (чаще всего водой), применяются контактные теплообменные аппараты, в которых передача теплоты сопровождается испарением части жидкости. Таковы процессы испарительного охлаждения оборотной воды в градирнях. Сюда же можно отнести процессы охлаждения газа водой в скрубберах, при очистке загрязненных газов. Для утилизации теплоты отходящих газов контактных сушилок и печей [34, 50, 76] в промышленности используются контактные экономайзеры.

Во всех перечисленных типах контактных аппаратов происходит непосредственное соприкосновение потоков газа и жидкости, в результате чего происходит передача теплоты и массы между газом и жидкостью. Так как этот процесс происходит на границе раздела газ-жидкость, то для интенсификации процесса и (или) уменьшения габаритов химико-технологического оборудования, требуется увеличить поверхность контакта между газом и жидкостью. Соответственно по способу организации поверхности тепломассообмена, перечисленные выше типы контактных аппаратов можно разделить на 1) капельные или распыливающие; 2) барботажные; 3) насадочные. Однако данная классификация не является

универсальной. Так, например, градирни в энергетике классифицируют на брызгальные и насадочные, последние из которых в свою очередь делятся на капельные и плёночные. В результате многолетнего опыта использования в промышленности и энергетике контактных газожидкостных аппаратов было выявлено, что аппараты с насадкой являются наиболее энергоэффективными [21]. Они компактны и обладают высокой эффективностью. Этим объясняется значительный интерес у исследователей к изучению насадочных аппаратов [56-65, 69, 70, 77-80, 85-89, 92, 97, 102, 105, 108], а также возросшее за последние два десятка лет количество отечественных и зарубежных организаций, предлагающих на рынке насадки и насадочные аппараты.

1.2. Виды насадок и их основные характеристики

К основным геометрическим характеристикам насадок относятся 1) удельная поверхность a ; 2) свободный объем ε ; 3) эквивалентный диаметр d_e .

Удельная поверхность: суммарная поверхность насадочных тел в единице занимаемого насадкой объема. Удельная поверхность обычно обозначается буквой a и измеряется в $\text{м}^2/\text{м}^3$. Чем больше величина удельной поверхности насадки, тем, как правило, выше эффективность насадочного аппарата, но ниже производительность и больше гидравлическое сопротивление.

Свободный объем: доля пустот между насадочными телами в единице объема, занимаемого насадкой. Свободный объем слоя насадки обозначается ε и измеряется в $\text{м}^3/\text{м}^3$. Чем больше свободный объем насадки, тем выше ее производительность и меньше гидравлическое сопротивление, однако при этом снижается эффективность работы насадки.

Эквивалентный диаметр канала слоя насадки (гидравлический радиус) d_e измеряется в метрах и определяется по формуле:

$$d_e = \frac{4\varepsilon}{a}. \quad (1.1)$$

Являясь характерным гидродинамическим размером насадки, этот параметр часто используется при расчетах тепло- и массообменной аппаратуры. Основные геометрические характеристики некоторых насадок систематизированы и были представлены в работе [57].

Насадки, используемые в промышленности принято разделять на насыпные и регулярные [31]. К насыпным насадкам относятся насадки, загружаемые в контактный аппарат «внавал» (т.е. засыпаемые в аппарат) [31]. При этом образуется хаотичная структура пустот в насадочной части аппарата. Регулярные (структурированные) насадки представляют собой готовые блоки, устанавливаемые в аппарат слоями (ярусами). При этом они образуют упорядоченную структуру. К ним же относятся насыпные насадки (как правило, кольцевые), уложенные в аппарат регулярно.

Простейшими представителями насыпных насадок являются кусковой кварц, кокс и адгезит [24], шары [31], которые нашли применение в промышленности еще с XIX века [31]. Важным этапом развития насыпных насадок стала разработка кольцевой насадки (Кольца Рашига), представляющей собой кольца из керамики, фарфора или стали (а позднее и из пластмассы), высота которых равна их наружному диаметру. В результате модернизации кольцевой насадки, в настоящее время множество других насадок, среди которых такие распространенные, как кольца Палля, кольца Ралу, кольца Бялецкого, Кольца Niflow, НУ-ПАК, кольца PSL и т.д. [31,108]. При этом основная тенденция развития колец Рашига на примере вышеперечисленных кольцевых насадок заключалась в увеличении их удельной поверхности за счет образования внутренних перегородок и уменьшении застойных зон в насадочном аппарате, за счет перфорации элементов насадки [30].

Другим путем увеличения эффективности кольцевой насадки, является создание миникольцевых насадок [26,61]. Миникольцевые насадки по

сравнению с кольцевыми насадками отличаются меньшим отношением высоты элемента насадки к её диаметру. К миникольцевым насадкам относятся насадки R-Pac, Glitsch 304, CMR ring, Glitsch CMR ring, McPac ring, миникольцевая насадка MICHM-X, насадка в форме колец Мёбиуса, миникольцевая насадка NT-1 и др. [26, 31, 57, 58, 61, 108]. При этом, во время заполнения аппарата миникольцевой насадкой, наблюдается тенденция преимущественно вертикальной самоориентации элементов насадки в аппарате (когда оси элементов кольцевых насадок вертикальны или составляют с вертикалью небольшой угол). Такая ориентация миникольцевых насадок в пространстве позволяет уменьшить количество застойных зон в контактном аппарате и более полноценно использовать всю поверхность насадочных тел.

Кроме кольцевых насадок, получила распространение также седлообразная насадка. Простейшая седлообразная насадка представляет собой четверть тонкостенного тора [31]. Развитие данного типа насадок пошло по пути оснащения элементов насадок перфорацией, рифлением, и уменьшение толщины стенок за счет использования пластмассы в качестве материала (вместо керамики). Седлообразные насадки из металла в поперечном сечении представляют собой полукольца с перфорацией, а в ряде случаев с отогнутыми лепестками, выдавленными дугами и т.д. К седлообразным насадкам относятся насадки Super saddle, Hiflow saddle, Intalox Saddle, Nutter ring, RMSR metal, Interpack, Metal conjugated ring [26, 31, 57, 108]. К ним же относится серия насадок отечественного ООО ИВЦ «Инжехим»: Инжехим 2000 [39, 77], Инжехим 2002 [79], Инжехим 2003-М [79], Инжехим 2004 [67].

Существуют и другие насадки, которые нельзя однозначно отнести к тому или иному типу насыпных насадок. К ним можно отнести насадки в форме винтовых поверхностей [31], розетку Теллера [108] и схожие с ней по конструкции насадки Dinpack [31], Snowflake [57], Starpak [108], насадки в виде полых шаров, напр. Хакетте [31], Топ-Пак [108], Polyhedral hollow ball

[108] и др. Некоторые конструкции насыпных насадок представлены на рис. 1.1.

Регулярные насадки появились позднее, чем первые насыпные насадки. Простейшим примером регулярной насадки может служить правильно уложенная в контактный аппарат кольцевая насадка, например кольца Рашига, кольца Палля и др. При этом образуется совокупность вертикальных каналов, открытых для прохода газа и сводится к минимуму количество зон, в которых может происходить задержка жидкости. К одним из первых регулярных насадок можно отнести плоскопараллельную насадку [51] и хордовую насадку [31, 45]. Плоскопараллельная насадка представляет собой вертикально устанавливаемые в контактный аппарат с небольшим зазором друг относительно друга металлические листы. Хордовая насадка представляет собой доски, устанавливаемые в аппарат вертикально, но, как правило, в несколько ярусов, каждый из которых повернут на угол, относительно соседних по высоте ярусов [37].

Для увеличения интенсивности тепломассообмена в газожидкостных контактных аппаратах химической промышленности потребовалось увеличение удельной поверхности насадок. Так появились регулярные насадки с гофрированной поверхностью и всевозможным рифлением. В качестве материала стали применять сталь. Для лучшего перераспределения жидкости в слое насадки и уменьшения застойных зон, элементы насадки стали оснащать отверстиями, щелями, пазами и т.д. В настоящее время, широко используются в промышленности насадки из гофрированных под углом к вертикали пластин. К таким насадкам можно отнести насадки Koch IV [48], насадки Mellapak, Montz A1, Montz A2, Montz A3, Montz B1 и т.д. [108]. Иногда такие насадки выполняют в виде рулонов, например насадка Инжехим [40].

Для большинства регулярных насадок поверхностью тепломассообмена является поверхность плёнки жидкости, а сама насадка представляет собой единые блоки. Однако, это характерно не для всех

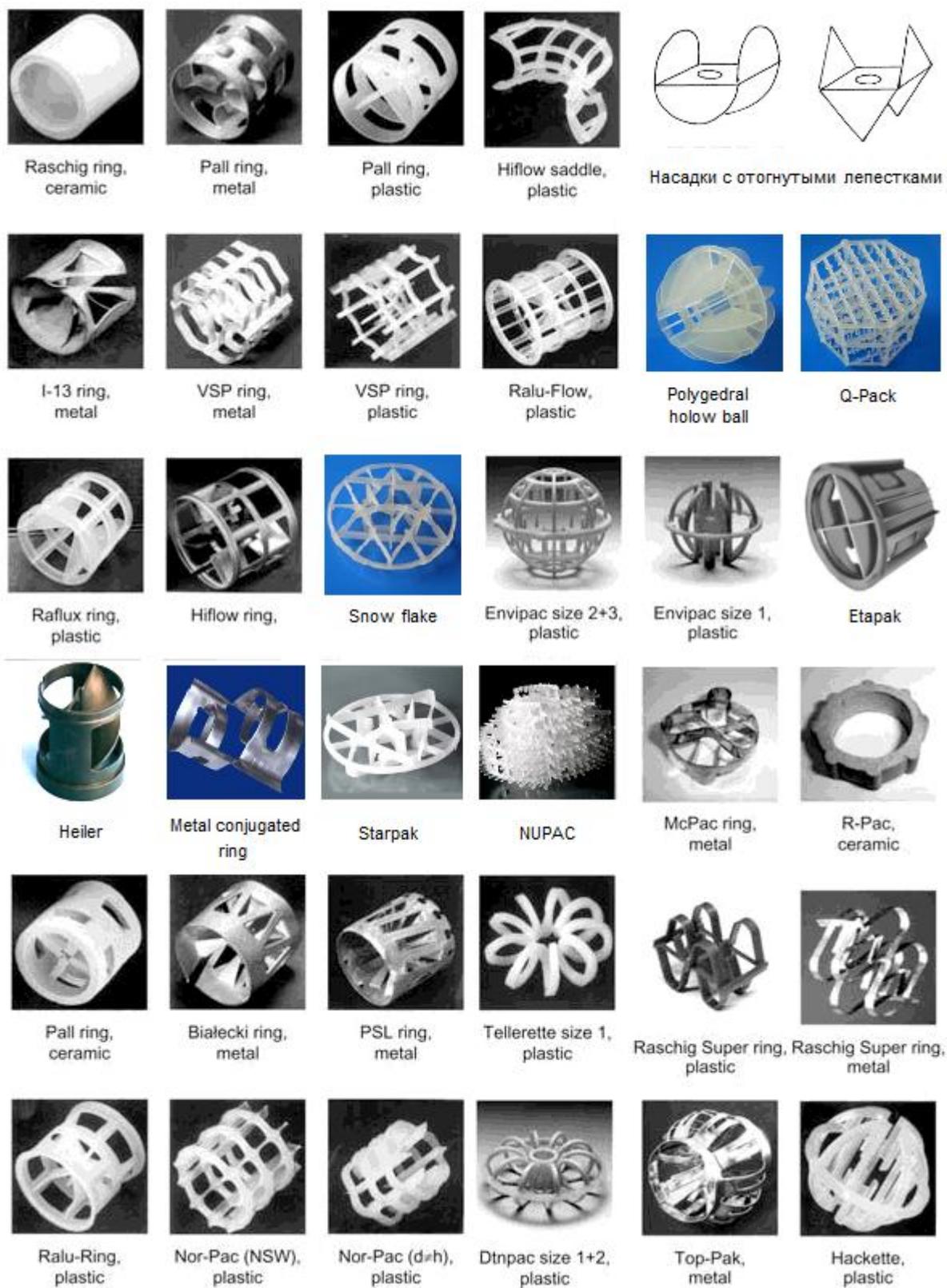


Рис. 1.1. Некоторые насыпные насадки

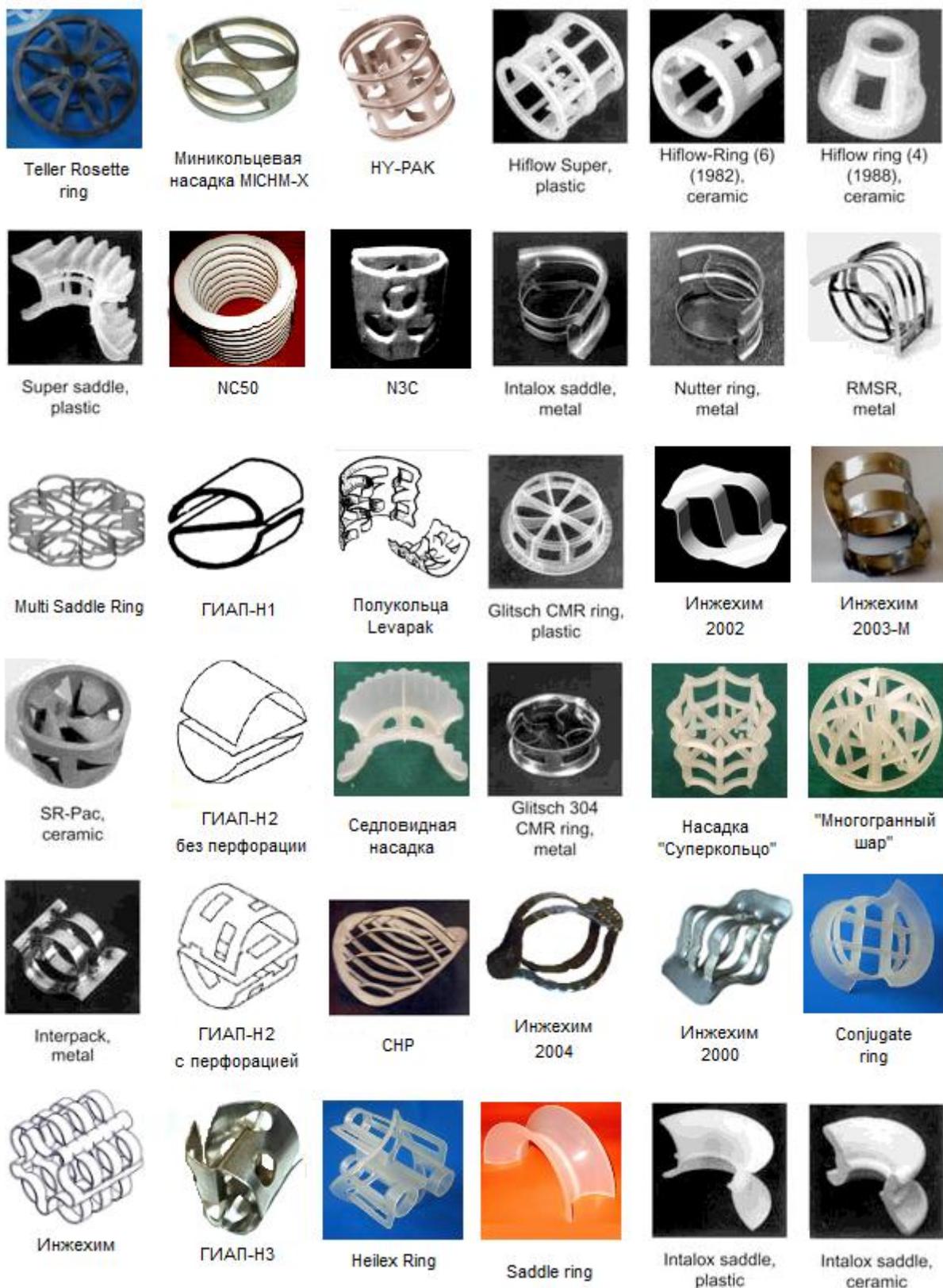


Рис. 1.1. Некоторые насыпные насадки (продолжение)

насадок. Так, например, в работе [1] описана конструкция уголковой насадки. Она представляет собой блоки из уголкового профиля, устанавливаемых в колонный аппарат в шахматном порядке, причем оси симметрии уголков параллельны вектору гравитации. При этом на данной насадке в качестве поверхности теплообмена попеременно выступает то плёнка жидкости, то капли жидкости вместе со струями жидкости, стекающие с вышележащих элементов насадки на нижележащие. В работе [80] описана конструкция двутавровой насадки. Она выполняется из двутаврового профиля, устанавливаемого в насадочный аппарат под углом 45° . Принципиальное отличие двутавровой насадки от многих других типов насадок заключается в том, что она работает в эмульсионном режиме. При этом газ барботирует через слой насадки, образуя множество пузырей, поверхность которых и является поверхностью теплообмена. В работе [10] предложена конструкция регулярной насадки с эффектом эжектирования. Насадка представляет собой пакеты гофрированных листов, установленных вертикально, вершинами гофр друг к другу. При этом образуется система зигзагообразных каналов для газа, в то время как жидкость перетекает с выступа гофр одного листа во впадину гофр соседнего листа с образованием плоской струи. Таким образом, для данной насадки процессы массообмена происходят между потоком газа, и пространственными струями жидкости. В Ивановском государственном химико-технологическом университете была разработана пакетная вихревая насадка [13, 14, 46, 53], работающая в устойчивом эмульсионном режиме при скоростях газа (пара) от 2,5 до 5,5 м/с. При этом, по мнению авторов [14], при движении газа через слой данной насадки, имеет место закручивание газожидкостной смеси. Это приводит к определенной интенсификации теплообмена, а также к сепарации капель. Следует отметить также необычную конструкцию цепной насадки, описанной в работах [64, 65]. Данная насадка представляет собой подвешенные в колонном аппарате цепи, по которым стекает плёнка жидкости. Движущийся противотоком газ

взаимодействует с гравитационно стекающей по цепям плёнкой жидкости. В литературе можно встретить также описание регулярных подвижных насадок, классификация которых предложена в работе [25]. Они представляют собой подвешенные на струнах насадочные тела. Однако они не получили широкого распространения.

Следует отметить, что в энергетике для градирен, как правило, вместо термина «насадка» (англ. Packing), используют термин «ороситель» (англ. Fill). В градирнях температура воды на входе, как правило, не выше 60 °С [54]. По этой причине в настоящее время в градирнях нашли широкое распространение оросители из полимерных материалов, например поливинилхлорида или полипропилена [38, 43]. Это определяется невысокой стоимостью полимерных материалов и их стойкостью при рабочих температурах воды в системах оборотного водоснабжения. Кроме того, полимерные материалы менее подвержены биообрастанию, что имеет место на хордовых насадках из дерева. Стоимость таких оросителей заметно ниже, чем стальных.

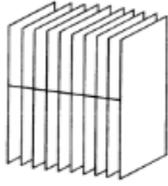
Следует отметить, что в градирнях насыпные насадки практически не используются. Это является следствием относительно более высокого гидравлического сопротивления насыпных насадок, по сравнению с регулярными. В процессах испарительного охлаждения оборотной воды, особенно в башенных градирнях с естественной тягой, важнейшим качеством оросителя является низкое гидравлическое сопротивление. Попытка создать оросители для градирен с низким гидравлическим сопротивлением привели к появлению капельных и капельно-плёночных оросителей. Таким образом, современная классификация насадок для градирен подразумевает их разделение на три типа: плёночные, капельные и капельно-плёночные. К плёночным относятся оросители, у которых теплообмен между воздухом и жидкостью происходит на поверхности плёнки жидкости, стекающей по насадке. К таким можно отнести насадки FX12.12, и серию насадок KSN фирмы GEA 2H Water technologies Ltd, насадки 1SP и 2SP [22],

насадки типа 22,5, 36+6 и ККУ [83], насадки КСН, КСН-1, КСН-2, КСН-3[85] и др. Оросители, для которых невозможно однозначно выделить, что собой представляет поверхность теплообмена – плёнку жидкости или капли, относят к капельно-плёночным. Такие оросители обычно имеют сетчатую структуру, и к ним можно отнести регулярную сетчатую насадку [9], гофрированную сетчатую насадку [106], сетчатые призмы и трубы [37, 38], полимерные оросители ОГББ, ОГГТ, ОГЛЗ и ОГК из работы [7]. К капельным относятся оросители, в которых теплообмен между воздухом и водой происходит преимущественно на поверхности капель, а сами насадки представляют собой объёмную решетку из планок или реек [54]. Наиболее высокой энергоэффективностью при испарительном охлаждении воды обладают плёночные оросители, однако используются они преимущественно там, где охлаждается чистая вода. Некоторые конструкции регулярных насадок и оросителей градилен представлены на рис. 1.2.

1.3. Конструктивные способы интенсификации процессов контактного теплообмена на регулярных насадках.

Проблема интенсификации газожидкостных теплообменных процессов является одной из наиболее актуальных в химической промышленности. В литературе можно найти множество работ, в которых рассматриваются вопросы интенсификации теплообмена в газожидкостных насадочных аппаратах. Также существует множество классификаций способов интенсификации теплообмена. По мнению автора, целесообразно разделить все конструктивные способы интенсификации теплообмена на регулярных насадках на следующие группы:

способы, связанные с увеличением удельной поверхности насадки (выполнение на поверхности элементов насадок гофра, рифления, лунок,



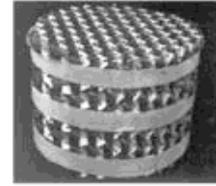
Плоскопараллельная
насадка (ППН)



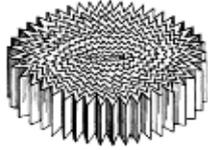
Хордовая
насадка



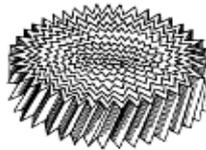
Кольца Рашига
"в укладку"



Mellapak 250
type Y
sheet metal



Рулонная насадка
с прямым гофром



Рулонная насадка
с косым гофром



"Зиг-заг"



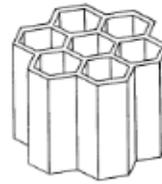
Montz B1-100
type Y
sheet metal



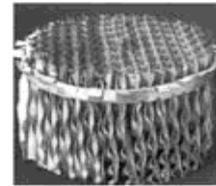
Щелевая
блочная
насадка



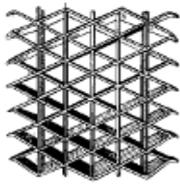
Решетчатая
блочная
насадка



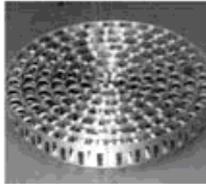
Сотовая
блочная
насадка



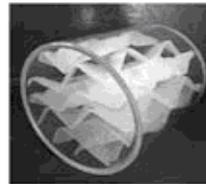
Montz A1
gauze packing
metal



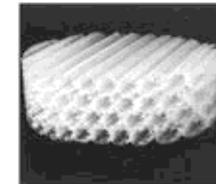
Стрейпак



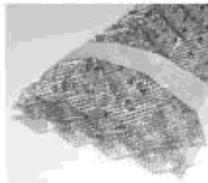
Fi-Pac
sheet metal



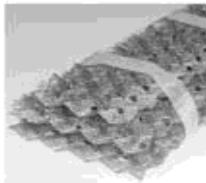
Mellapak 250Y
type Y
plastic



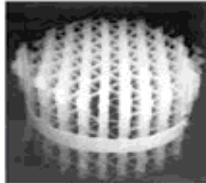
Nor-Pac
Kompakt
plastic



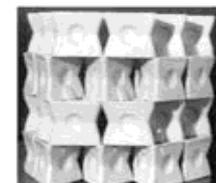
Montz BS
gauze packing
metal



Montz BSH
gauze packing
metal



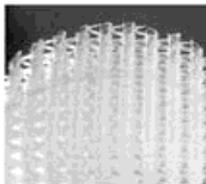
Montz C2-200
type Y
plastic



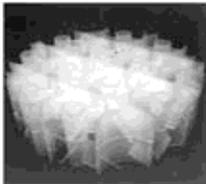
Impuls packing
ceramic



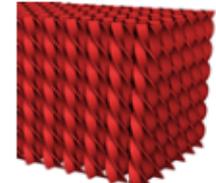
Sulzer BX
gauze packing
metal



Durapack



Nor-Pac
swirl packing
plastic



PN-1D

Рис. 1.2. Некоторые регулярные насадки

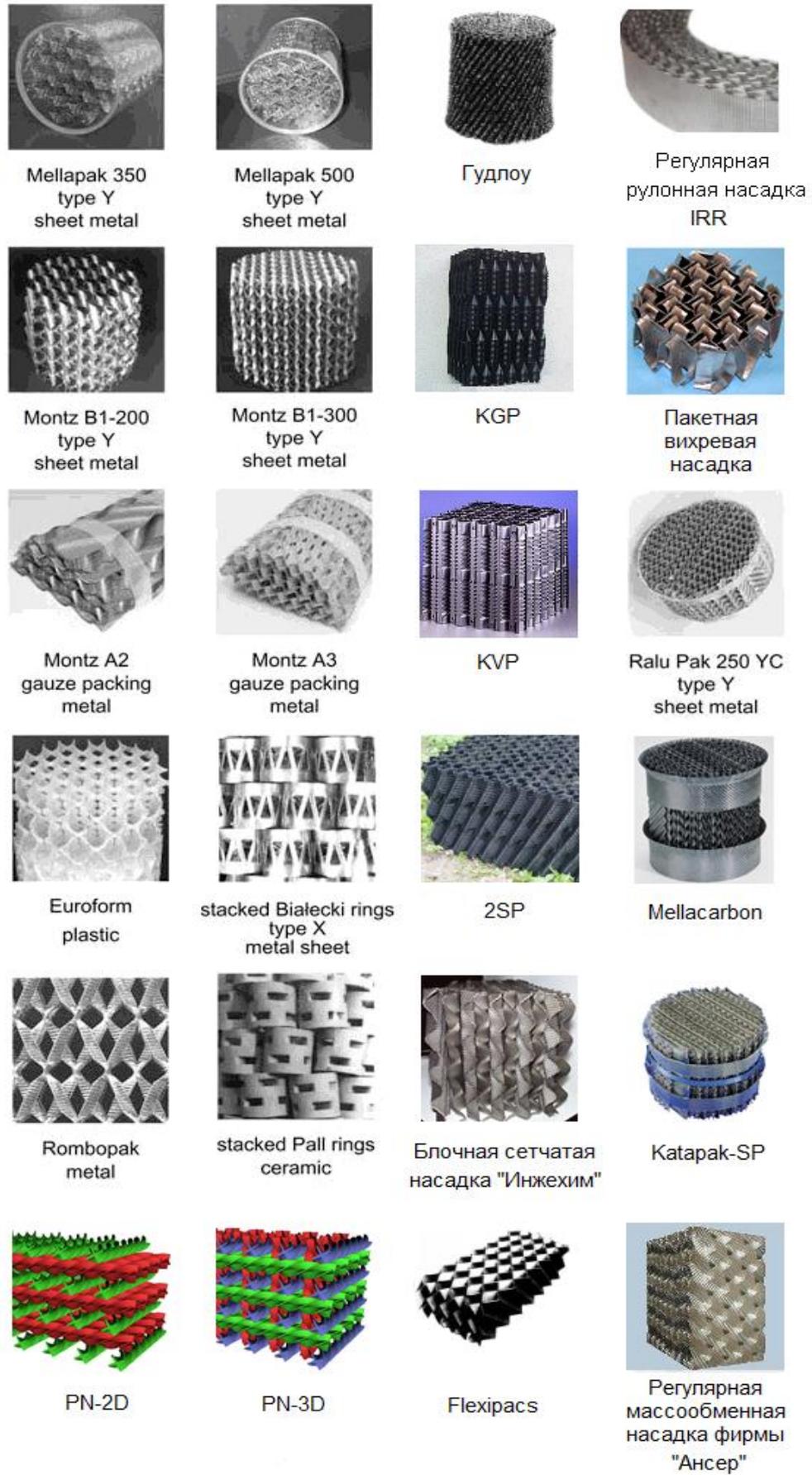


Рис. 1.2. Некоторые регулярные насадки (продолжение)

крупномасштабной регулярной шероховатости и т.д., применение волокнистых насадок и др. способы);

- способы, связанные с улучшением распределения жидкости в слое насадки (выполнение насадок из хорошо смачиваемых орошающей жидкостью материалов, выполнение на насадках отверстий, щелей, просечек и т.д.);

- способы, связанные с изменением конфигурации насадочного слоя (установка соседних блоков насадки под углом друг относительно друга, установка блоков насадки с зазором по высоте аппарата, уменьшение высоты ярусов насадки и т.д.);

- другие способы.

Первая группа способов широко используется в химической и других отраслях промышленности. Выполнение гофр на элементах насадки позволяет значительно развить удельную поверхность насадки. Мелкое рифление позволяет увеличить удельную поверхность даже у уже гофрированных насадок. Так как количество переданных теплоты и массы в процессах теплообмена пропорциональной поверхности контакта фаз, то способы первой группы достаточно давно и успешно используются для интенсификации. Способы, связанные с улучшением распределения жидкости в слое насадки, не являются широко распространенными (за исключением выполнения насадки из хорошо смачиваемых материалов). Кроме того они малоизучены. Так, например, выполнение перфорации на элементах насадки однозначно приводит к уменьшению удельной поверхности насадки. Однако, из анализа экспериментальных работ некоторых авторов [12, 41, 42, 109], можно сделать вывод, что отверстия в насадке обеспечивают перетекание жидкости с одной стороны элемента насадки на другую. Это должно обеспечивать не только эффективное перемешивание жидкости на элементах насадки, но и более равномерное распределение жидкости в аппарате. В условиях неравномерного орошения,

отверстия в насадке могут обеспечить более полное смачивание насадки. Однако в литературе крайне редко встречаются работы, посвященные изучению влияния перфорации в элементах насадки на площадь активной поверхности насадки или на коэффициенты теплообмена и массообмена.

В последнее время в литературе можно наблюдать работы, посвященные изучению влияния компоновки блока насадки на коэффициент массоотдачи [60, 85, 86]. Так, например, выполнение насадочного слоя из большого количества блоков насадки незначительной высоты позволяет при одном и том же объеме насадки добиться более высоких коэффициентов массоотдачи [85].

Значительный интерес представляет также перекрёстноточная схема (поперечный ток) организации процесса тепломассообмена в насадочных аппаратах (см. рис. 1.3). Однако, преимущества этого способа организации движения взаимодействующих потоков не так очевидны. Это связано с особенностями процессов контактного теплообмена между газом и жидкостью на насадках. Дело в том, что современные регулярные насадки, в большинстве своем, представляют собой блоки из собранных под углом гофрированных листов (например, см. работы [22, 83, 85, 106, 109]). Хотя данные насадки и обладают высокой удельной поверхностью, но в процессах контактного теплообмена, как правило, работают в условиях неполного смачивания. К этому выводу можно прийти на основе анализа методик расчета контактных аппаратов [24, 31, 55]. Так, например, при расчете плотности орошения в контактных насадочных противоточных аппаратах принято пользоваться формулой [24]:

$$q_{\min} = 0,12 \dots 0,24 a_{\text{нас}}. \quad (1.2)$$

Расчет по формуле (1.2) позволяет, например, рассчитать что насадке с удельной поверхностью $a = 50 \text{ м}^2/\text{м}^3$ для гарантированного смачивания поверхности требуется обеспечить плотность орошения q не менее $12 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$. В то же время в градирнях плотность орошения редко превышает $11 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$ [54]. В работе [55] для контактных теплообменных аппаратов,

автор ограничивает плотность орошения значением $9 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$. При увеличении плотности орошения (за счет уменьшения площади поперечного сечения аппарата) можно добиться увеличения коэффициента смачивания Φ' . Однако уменьшение площади поперечного сечения аппарата приводит также к увеличению скорости газа. С ростом скорости газа кроме очевидного увеличения коэффициента массоотдачи (приблизительно пропорционально скорости газа в степени 0,6-0,8), происходит уменьшение глубины охлаждения, из-за большего объема жидкости в насадочном слое. Кроме того, рост скорости газа в аппарате влечет за собой увеличение гидравлического сопротивления аппарата и рост уноса капельной жидкости. Более того, увеличение скорости газа ограничено явлением захлебывания насадочного аппарата при больших скоростях газа. Из вышесказанного можно сделать вывод, что использование насадок с высокой площадью удельной поверхности зачастую оказывается малоэффективным.

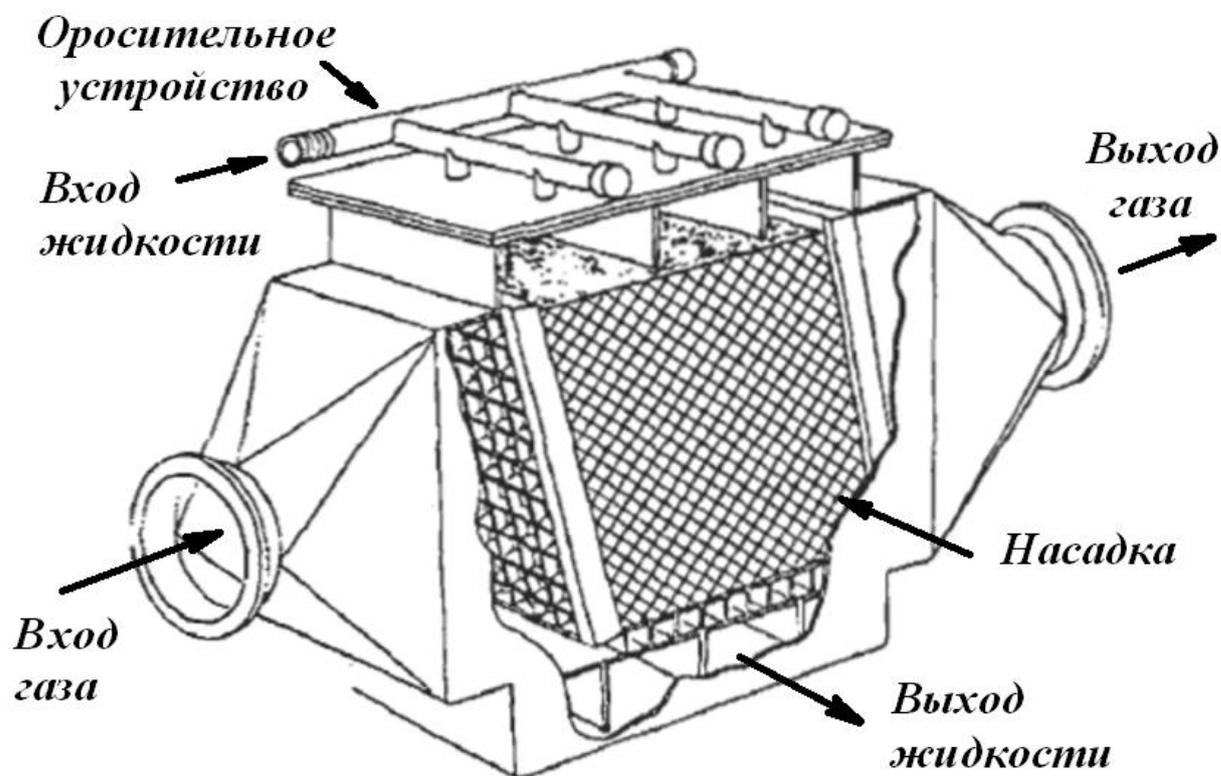


Рис. 1.3. Насадочный перекрёстноточный аппарат

¹ Коэффициент смачивания представляет собой отношение смоченной поверхности насадки, к геометрической поверхности насадки. При полном смачивании насадки, когда вся поверхность насадочных тел покрыта плёнкой жидкости, коэффициент смачивания равен 1. Иногда его включают в формулу критерия Нуссельта или Шервуда в знаменатель [32].

Похожая ситуация наблюдается и в контактных аппаратах для охлаждения горячих газов (контактных экономайзерах). В них, помимо охлаждения горячих газов, как правило, ставится цель получить воду с максимально высокой температурой, которая может в дальнейшем использоваться для различных технологических или бытовых нужд. Этому может способствовать уменьшение плотности орошения (в противоточных аппаратах). Однако при этом, как уже отмечалось, возможно неполное смачивание поверхности насадки.

Преимущество перекрёстного тока по сравнению с противотоком заключается в том, что в условиях перекрёстного тока возможна компоновка блока насадки таким образом, чтобы сечение для прохода газа было больше сечения для прохода жидкости [90]. Таким образом, оказывается возможным изменять плотность орошения за счет изменения соотношения длины, ширины и высоты блока насадки, не влияя при этом на скорость газа. При небольших скоростях газа оказывается возможным обеспечить достаточную плотность орошения насадки, без увеличения расхода жидкости и скорости газа, тем самым ограничивая явление уноса жидкости и не увеличивая гидравлическое сопротивление аппарата по газу.

Следует отметить, что, несмотря на то, что, как известно [38], процессы контактного теплообмена лимитируются газовой фазой, значительную роль в аппаратах рассматриваемого типа играет также движение жидкости. Гофрирование, зиговка и рифление поверхности насадок, помимо увеличения удельной поверхности насадки, влияет на особенности плёночного течения жидкости по насадке, на коэффициент смачивания и т.д. Перфорация поверхности насадки может интенсифицировать перетекание жидкости с одной стороны элемента насадки на другую. Выполнение насадки из хорошо смачиваемых материалов позволяет обеспечить полное смачивание насадки при малых расходах жидкости. Выполнение блоков насадки небольшой высоты (для противоточных аппаратов) позволяет обеспечивать высокие значения коэффициентов массоотдачи [85]. Этому также способствует

перекрёстный ток, в условиях которого блок насадки может быть выполнен небольшой длины, что обеспечивает как высокие значения движущей силы, так и высокую плотность орошения. Поэтому с целью оптимизации конструкции насадочного контактного теплообменного аппарата представляется целесообразным рассмотреть особенности гидродинамики различных регулярных насадок (как наиболее энергоэффективных контактных устройств).

1.4. Особенности гидродинамики плёночных регулярных насадок

Регулярные насадки нашли наибольшее распространение на промышленных и энергетических предприятиях. В первую очередь это относится к тем насадкам, у которых поверхностью тепло- и массообмена является плёнка жидкости (сюда же относятся плёночные оросители градирен). Как правило, такие регулярные насадки сочетают в себе низкое гидравлическое сопротивление и высокую эффективность [21, 39]. Во многом именно от характеристик плёночного течения жидкости по поверхностям насадок зависит эффективность процесса тепломассообмена в контактных аппаратах. Регулярные насадки обычно представляют собой гладкие или шероховатые поверхности, оснащенные рифлением, перфорацией, гофрами, щелями и т.д. Столь большое разнообразие конфигураций форм и рельефа поверхностей насадок является следствием того, что не имеется достаточно полного представления о влиянии рельефа поверхности насадки на особенности плёночного течения жидкости и эффективность тепломассообменных процессов. Характеристики плёночного течения, такие как толщина плёнки жидкости, скорость стекания плёнки жидкости, площадь смоченной поверхности насадки и т.д. напрямую зависят от геометрии насадки. Ввиду многообразия форм, размеров и конфигурации регулярных насадок сложно систематизировать закономерности плёночного течения жидкости по их поверхностям. Представляется целесообразным

проанализировать процессы течения жидкости отдельно по гладким поверхностям и по поверхностям с комплексной геометрией.

1.4.1. Течение плёнки жидкости по гладким вертикальным и наклонным поверхностям

При гравитационном течении плёнки жидкости по гладкой вертикальной или наклонной поверхности имеют место несколько режимов течения плёнки жидкости. Обычно, выделяют пять режимов течения: ламинарный безволновой, первый ламинарный волновой, второй ламинарный волновой, псевдотурбулентный и турбулентный [51]. Границы режимов течения плёнки жидкости по гладкой вертикальной поверхности представлены в табл. 1.1. В некоторых работах, выделяют всего три режима течения: ламинарный, турбулентный и волновой. Наиболее изучен ламинарный режим течения плёнки жидкости, исследованием которого занимался еще Нуссельт. Им же впервые получено выражение для определения толщины плёнки жидкости, при её гравитационном течении по гладкой поверхности [15]:

$$\delta = \left(\frac{3}{4} \frac{v_{ж}^2}{g} Re_{пл} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1.3)$$

где $Re_{пл}$ – плёночное число Рейнольдса, определяемое по формуле $Re_{пл} = 4\Gamma/v_{ж}$ [3]. Для нахождения толщины плёнки жидкости, стекающей по наклонной поверхности, знаменатель в правой части уравнения умножают на синус угла наклона поверхности (по которой стекает жидкость) к вертикали.

На практике ламинарное течение практически не используется. Это связано с его неустойчивостью. Еще П.Л. Капицей [28] отмечено, что волновое течение более устойчиво из-за меньшей средней толщины плёнки жидкости, чем при ламинарном течении. При малых расходах жидкости (вблизи нижней границы режима течения), ламинарное плёночное течение

легко переходит в ручейковое, а при больших (вблизи верхней границы) на поверхности плёнки жидкости появляются волны. Отметим, что волны появляются даже при малых расходах жидкости на большом расстоянии от места орошения (более метра).

Табл. 1.1. Границы режимов гравитационного течения плёнки жидкости по гладкой вертикальной поверхности для ньютоновской жидкости [71]

Наименование режима течения	Нижняя граница режима	Верхняя граница режима
Ламинарный	Зависит от условий устойчивости плёнки	$Re_{пл} = 1,88Fi^{1/10}$
Первый переходный	$Re_{пл} = 1,88Fi^{1/10}$	$Re_{пл} = 8,8Fi^{1/10}$
Волновой	$Re_{пл} = 8,8Fi^{1/10}$	$Re_{пл} = 300$
Второй переходный	$Re_{пл} = 300$	$Re_{пл} = 1600$
Турбулентный	$Re_{пл} = 1600$	

Начало изучения волнового течения плёнки жидкости было положено П.Л. Капицей в середине прошлого столетия [28]. В дальнейшем, значительного успеха в изучении волновых течений плёнки жидкости, добились сотрудники института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН [3, 4, 5, 12, 109]. Остановимся на следующих особенностях волновых течений. Волновое течение плёнки жидкости характерно появлением на свободной поверхности плёнки жидкости волн различных форм и размеров. При этом профиль волн изменяется при изменении расхода жидкости, при изменении расстояния от источника орошения, при нагреве плёнки жидкости, при пульсациях расхода и т.д. На рис. 1.4 представлена схема эволюции волн при гравитационном течении плёнки водоглицеринового раствора по поверхности цилиндра, диаметром 60 мм (h – высота орошаемого цилиндра, мм). Из рисунка можно видеть, что по высоте орошаемого участка, волны на поверхности насадки изменяют свой профиль – передний склон волн становится более крутым, принимая форму, называемую солитоном (см. рис. 1.5). При этом по высоте орошаемого

участка волны из двумерных (кольцевых) становятся трехмерными (см. рис. 1.4). Для практических тепломассообменных расчетов это затрудняет определение действительной поверхности тепломассообмена. Кроме того профиль волн влияет также и на перемешивание в плёнке жидкости, а, следовательно, и на массопередачу в жидкой фазе. Средняя толщина плёнки жидкости при волновом течении по вертикальной поверхности с достаточной для практических расчетов точностью может быть определена по формуле (1.3) [15].

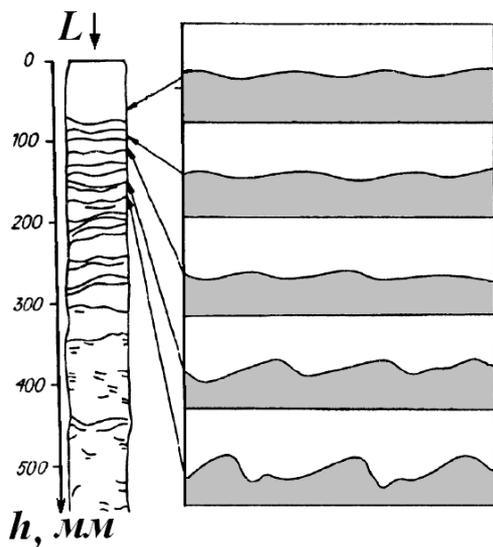


Рис. 1.4. Эволюция волн, стекающих по поверхности вертикального цилиндра при $Re_{пл} = 60$ [3]

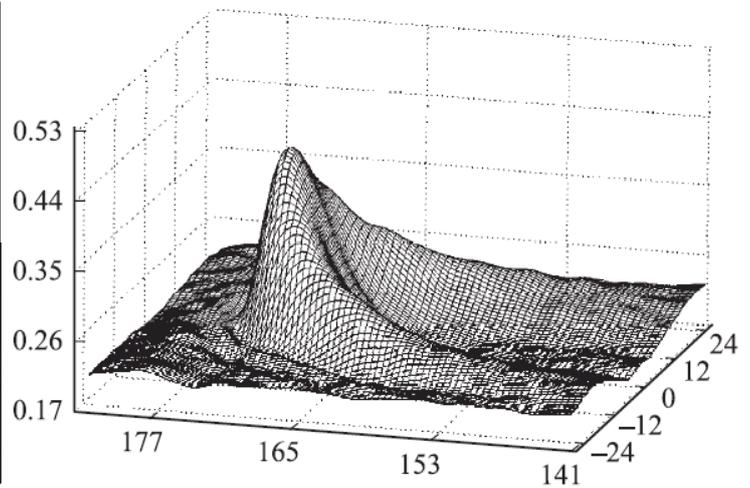


Рис. 1.5. Форма волны типа «солитон» (шкала в мм) [4]

При увеличении плёночного числа Рейнольдса $Re_{пл} > 1200 \pm 200$, в плёнке жидкости начинает развиваться поперечное перемешивание. Профиль скорости в плёнке жидкости становится турбулентным, что характеризуется уменьшением отношения скорости плёнки жидкости на свободной поверхности к средней скорости плёнки жидкости. Для определения средней толщины плёнки жидкости (в мм) для турбулентного течения, применяют формулу [37]:

$$\delta = 3,117 \frac{\Gamma^{12} \cdot \nu_L^{12}}{g^3}. \quad (1.4)$$

В реальной тепломассообменной аппаратуре не всегда даже при достаточном орошении вся поверхность насадки оказывается смоченной. Это отмечается в работе [114], где средствами компьютерных программ вычислительной гидродинамики моделируется течение плёнки жидкости по гладкой пластине, установленной под углом 60° к горизонту. Результаты моделирования плёночного течения [114] представлены на рис. 1.6 в виде зависимости толщины плёнки жидкости от расхода жидкости (выражаемого через число Вебера). Из рисунка видно, что при малых расходах орошающей жидкости, на некотором расстоянии от места орошения, плёночное течение переходит в ручейковое. Кроме того авторы работы [114] отмечают, что на величину смоченной поверхности значительное влияние оказывает направления изменения расхода жидкости.

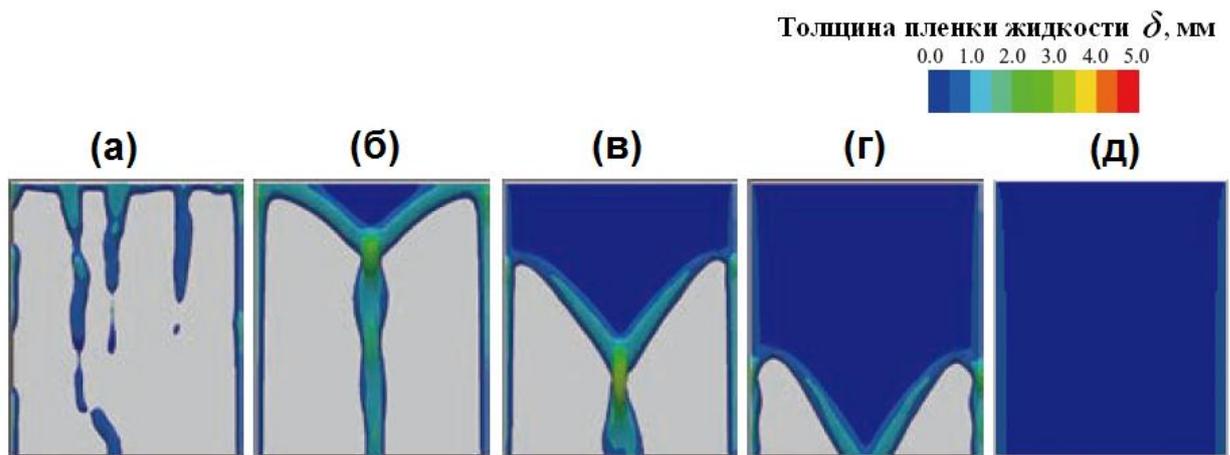


Рис. 1.6. Схема течения плёнки жидкости по гладкой наклонной поверхности при $We = 0,04$ (а); $We = 0,42$ (б); $We = 0,80$ (в); $We = 1,14$ (г); $We = 1,44$ (д) [114]

Обработка результатов экспериментов в работе [114], также позволила установить зависимость коэффициента смачивания, равного отношению площади смоченной поверхности, к площади всей орошаемой поверхности, от числа Вебера. Эта зависимость представлена на рис. 1.7. Из неё видно, что на величину смоченной поверхности сильное влияние оказывает направление изменения расхода жидкости. Анализируя кривые на рис. 1.6 можно наблюдать гистерезис в диапазоне чисел Вебера от 0,6 до 1,4.

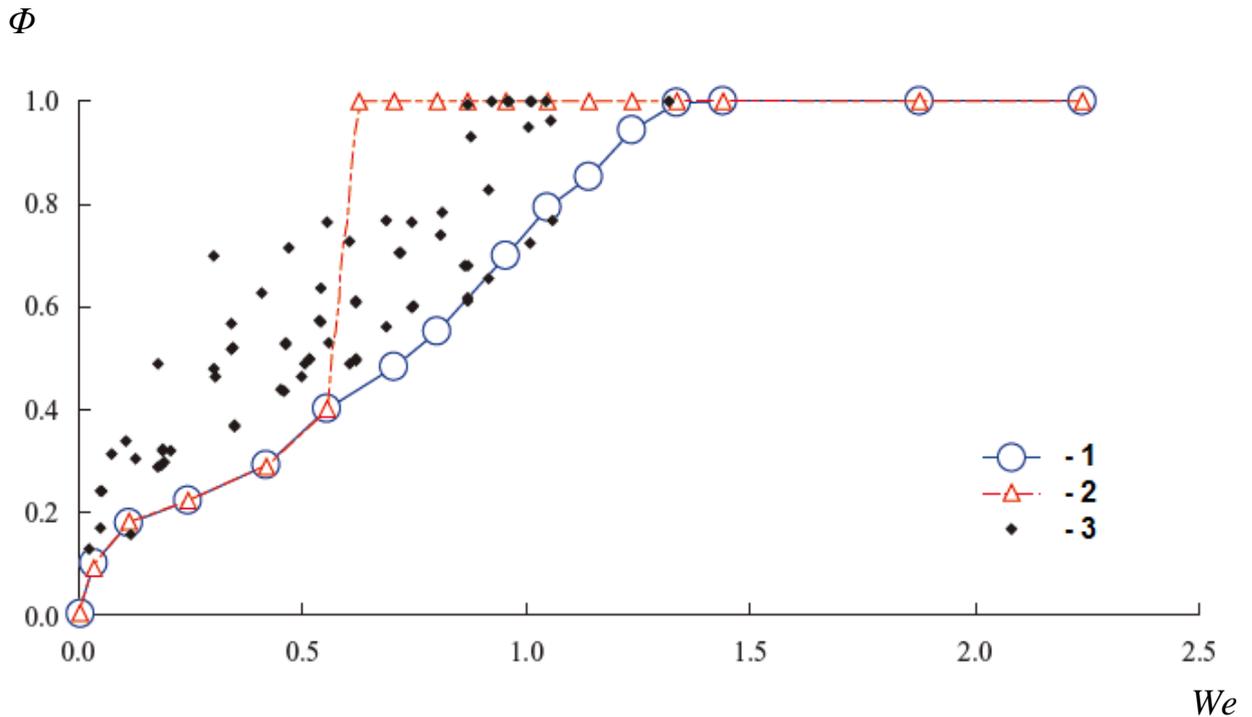


Рис. 1.7. Зависимость коэффициента смачивания от числа Вебера; 1 – при увеличении расхода жидкости; 2 – при уменьшении расхода жидкости; 3 – данные работы [102]

1.4.2. Течение плёнки жидкости по насадкам и поверхностям с комплексной геометрией

Простейшим случаем плёночного течения жидкости по поверхностям с комплексной геометрией, является случай гравитационного течения плёнки жидкости по поверхности с регулярной шероховатостью. В зависимости от высоты выступов регулярной шероховатости изменяется и характер плёночного течения.

В работе [52] отмечено, что при течении плёнки жидкости по поверхности с регулярной песочной шероховатостью, критическое значение плёночного числа Рейнольдса $Re_{кр}$ ниже, чем на гладкой. Критическим, в данном случае, считают значение плёночного числа Рейнольдса, отвечающее переходу от волновых режимов течения к турбулентным. Там же представлена критериальная зависимость, для нахождения критического значения плёночного числа Рейнольдса:

$$Re_{кр} = 1600 \left[1 - 0,25 \left(\frac{h_{ш}}{6 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,5} \left(\frac{s_{ш}}{h_{ш}} \right)^{1,74} \exp \left(-0,35 \frac{s_{ш}}{h_{ш}} \right) \right]. \quad (1.5)$$

В уравнении (1.5) отношение $h_{ш} / 6 \cdot 10^{-4}$ представляет собой отношение высоты выступов регулярной шероховатости $h_{ш}$ к максимальной высоте выступов шероховатости в экспериментах авторов [52]. При высоте выступов регулярной шероховатости более 0,6 мм уравнение (1.5) не применимо. Это связано с самим механизмом появления турбулентности при течении по шероховатой поверхности. Если высота выступов сопоставима или меньше толщины вязкого подслоя гравитационно стекающей плёнки жидкости ($h_{ш} < 0,6$ мм), то при плёночном течении вязкий подслой разрушается с образованием вихрей, интенсифицирующих поперечное перемешивание в плёнке жидкости. Более ранний переход от ламинарного течения плёнки жидкости к турбулентному происходит и на поверхностях с другими типами регулярной шероховатости, например с сеточным покрытием [74].

Если высота выступов шероховатости больше толщины вязкого подслоя, то плёнка жидкости при гравитационном течении огибает выступы шероховатости без разрушения вязкого подслоя. Такое течение рассматривалось в работе [59] для случая течения жидкости по поверхности насадки из гофрированных полимерных труб. Авторы работы отмечают, что толщина плёнки жидкости на выступах гофр меньше, чем во впадинах. Ими же предложены уравнения для расчета средней толщины плёнки жидкости во впадинах гофр:

$$\delta = \left(0,83 \frac{v_{жс}^2}{g} Re_{пл} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1.6)$$

и для расчета толщины плёнки жидкости на выступах гофр:

$$\delta = \left(0,68 \frac{v_{жс}^2}{g} Re_{пл} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (1.7)$$

Из анализа уравнений (1.6) и (1.7) видно, что они отличаются от выражения Нуссельта (1.3) значением постоянного множителя. Однако, в работе [59] отсутствует информация о профиле гофр на насадке, а в формулы (1.6) и (1.7) не входит характерный размер гофр, что ограничивает возможность использование этих формул для практических расчетов.

В работе [107] представлены результаты измерения толщины плёнки жидкости, стекающей по поверхности с регулярной шероховатостью. Исследуемый участок представлял собой плоскую пластину с поперечными канавками глубиной 0,15 мм и шириной 0,5 мм. Расстояние между соседними канавками составляло 1,5 мм. Толщина плёнки жидкости измерялась методом касания, что позволило получить картину распределения средней толщины плёнки жидкости на орошаемой поверхности (рис. 1.8). Анализ рис. 1.8 показывает, что толщина плёнки жидкости во впадинах гофр не всегда больше, чем на выступах гофр, что не согласуется с данными работы [59]. Это связано, вероятно, с тем, что при течении плёнки жидкости по поверхностям, представляющим собой тела вращения (например, вертикальная гофрированная труба), увеличение толщины плёнки жидкости во впадинах (канавках) может происходить частично из-за того, что во впадинах уменьшается смоченный периметр. При постоянном расходе жидкости это приводит к увеличению плёночного числа Рейнольдса, и, как следствие, к увеличению толщины плёнки жидкости.

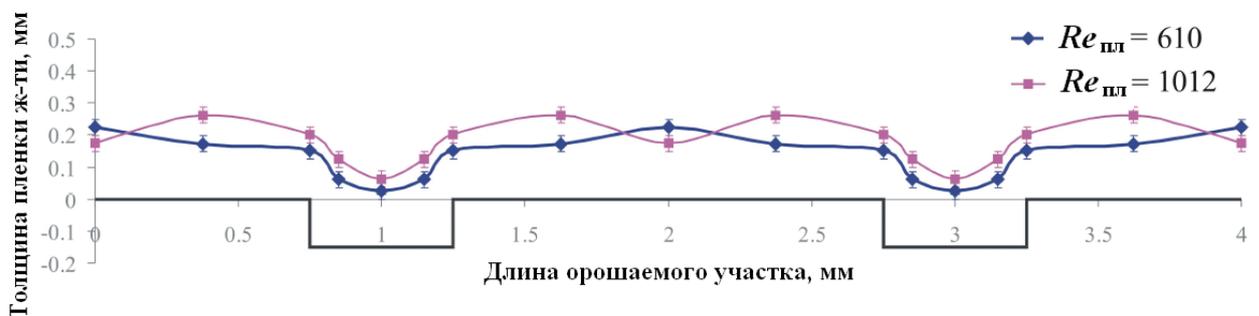
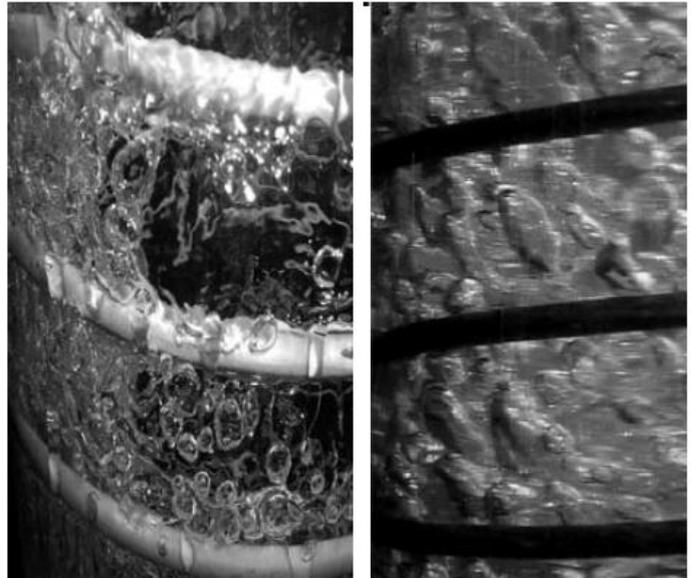


Рис. 1.8. Распределение средней толщины плёнки жидкости, стекающей по вертикальной поверхности с поперечными канавками [107];

В работах [11, 47, 52] исследовались плёночные биореакторы, в которых жидкость движется турбулентной плёнкой по внутренней поверхности вертикальных труб. Для интенсификации массопередачи в жидкой фазе на внутреннюю поверхность труб наносилась регулярная шероховатость в виде проволочных спиралей. В монографии [52] отмечается, что течение жидкости по внутренней поверхности труб со спиральной шероховатостью при высоте витков $1,5 < h_{ш} < 10$ мм характеризуется наличием трех режимов течения: струйного, кольцевого и режима однофазного течения (полное заполнение трубы). Шероховатость в виде проволочной спирали придает плёнке жидкости вращательное движение в трубе. Также следует отметить, что при высоких расходах жидкости в результате скоростного обтекания гребней выступов регулярной шероховатости образуется разность статических давлений между свободной поверхностью плёнки жидкости и внутренней стенкой трубы. Это приводит к барботажу газа в плёнку жидкости и повышению его газосодержания (см. рис. 1.9). Это также можно проследить в работе [98], где средствами компьютерных программ вычислительной гидродинамики исследуется обтекание выступов в виде полукруга и круга (двумерная задача) плёнкой жидкости. Полученные профили плёнки жидкости отчетливо демонстрируют явления захвата газовых пузырей при обтекании преграды круглого сечения плёнкой жидкости. В работе [47] представлены результаты экспериментального исследования зависимости средней толщины плёнки жидкости от соотношения $S_{ш} / h_{ш}$. При этом установлено, что с увеличением соотношения $S_{ш} / h_{ш}$ от 0 (без спиральной шероховатости) до 8, средняя толщина плёнки жидкости увеличивается и достигает максимума при $8 < S_{ш} / h_{ш} < 12$. Дальнейшее увеличение соотношения $S_{ш} / h_{ш}$ приводит к уменьшению средней толщины плёнки жидкости.

В работе [8] представлена математическая модель процесса гравитационного течения плёнки жидкости по поверхности с перпендикулярными потоку жидкости спицами круглого сечения (двумерная задача). Этот случай гравитационного течения плёнки жидкости аналогичен условиям эксперимента, поставленным в работе [47]. В результате была получена пригодная для расчета средней толщины плёнки жидкости



(a)

(б)

Рис. 1.9. Течение плёнки жидкости по внутренней поверхности вертикальной трубы со спиральной шероховатостью при $Re_{пл} = 5000$ (а) и при $Re_{пл} = 10000$ (б) [11]

формула. При отношении $6,7 < S_{ш} / h_{ш} < 13,3$, средняя толщина плёнки жидкости может быть найдена по формуле:

$$\delta = \frac{Re_{пл} \cdot v^2}{h_{ш} \cdot S_{ш} \cdot g} \cdot \left(-0,429 \frac{S_{ш}}{h_{ш}} + 50,05 \right). \quad (1.8)$$

При отношении $13,3 < S_{ш} / h_{ш} < 20$, средняя толщина плёнки жидкости может быть найдена по формуле:

$$\delta = \frac{Re_{пл} \cdot v^2}{h_{ш} \cdot S_{ш} \cdot g} \cdot \left(-0,028 \frac{S_{ш}}{h_{ш}} + 44,73 \right). \quad (1.9)$$

Формулы (1.8) и (1.9) могут быть использованы для случая полного смачивания поверхности насадки. Для величины отношения $S_{ш} / h_{ш} < 6,7$ соотношение для расчета средней толщины плёнки жидкости в работе [8] не представлено.

В работе [97] исследовалось течение плёнки жидкости по поверхности с регулярной шероховатостью типа «впадина». В этой работе показано, что наличие регулярной шероховатости на поверхности насадки ускоряет переход от ламинарного режима течения плёнки жидкости к турбулентному.

Это совпадает с выводами работы [52]. При этом наименьшее значение критического числа Рейнольдса, отвечающее переходу от волнового режима течения к турбулентному, соответствует насадке с параметром $S_{ш}/h_{ш} \approx 10$ (в данном случае $h_{ш}$ представляет собой глубину канавки). Кроме того опыты [97] показывают, что при уменьшении параметра $S_{ш}/h_{ш}$, в диапазоне от 30 до 2,5 средняя толщина плёнки жидкости увеличивается. Это объясняется тем, что при уменьшении соотношения $S_{ш}/h_{ш}$, т.е. при увеличении количества канавок на пути фронта стекающей плёнки жидкости, увеличивается гидравлическое сопротивление плёночному течению. Как следствие уменьшается скорость течения плёнки жидкости и растёт её толщина.

Один из важнейших выводов работы [97] заключается в том, что регулярная шероховатость типа «впадина» (ориентированная поперек фронта стекающей плёнки жидкости) увеличивает равномерность распределения плёнки жидкости на поверхности полимерного листа насадки. Остановимся на этом подробнее. Особенность гравитационного течения плёнки жидкости по гладким плоским поверхностям заключается в том, что в реальных условиях на определенном расстоянии от места орошения, может изменяться характер течения с плёночного на ручейковый. Этому посвящена работа [114], где авторы исследуют плёночное течение жидкости по поверхности с треугольным гофрированием (высота гофр 0,6 мм, длина 2,8 мм). Гофры ориентированы горизонтально поперек фронта стекающей плёнки жидкости. Характер плёночного течения жидкости на данной поверхности при различных числах Вебера представлен на рис. 1.10. На гладкой поверхности характер плёночного течения представлен на рис. 1.6. Из рис. 1.10 видно, что для шероховатой поверхности полное смачивание наступает при меньших расходах орошающей жидкости (при $We = 1,14$), чем для гладкой поверхности (при $We = 1,44$) (см. рис.1.6). Похожие результаты были получены в работе [94], где исследовалось течение жидкости по наклонной гладкой и структурированной поверхностям. При этом в отличие от работы [114] структурированная поверхность представляла собой пластину с

продольным (а не поперечным) рельефом в виде выступов прямоугольного профиля (ширина 0,4 мм, высота 0,2 мм, зазор между соседними выступами 0,8 мм). В этой работе также установлено, что наличие на поверхности выступов приводит к полному смачиванию поверхности при меньших расходах жидкости, чем это имеет место на гладких поверхностях.

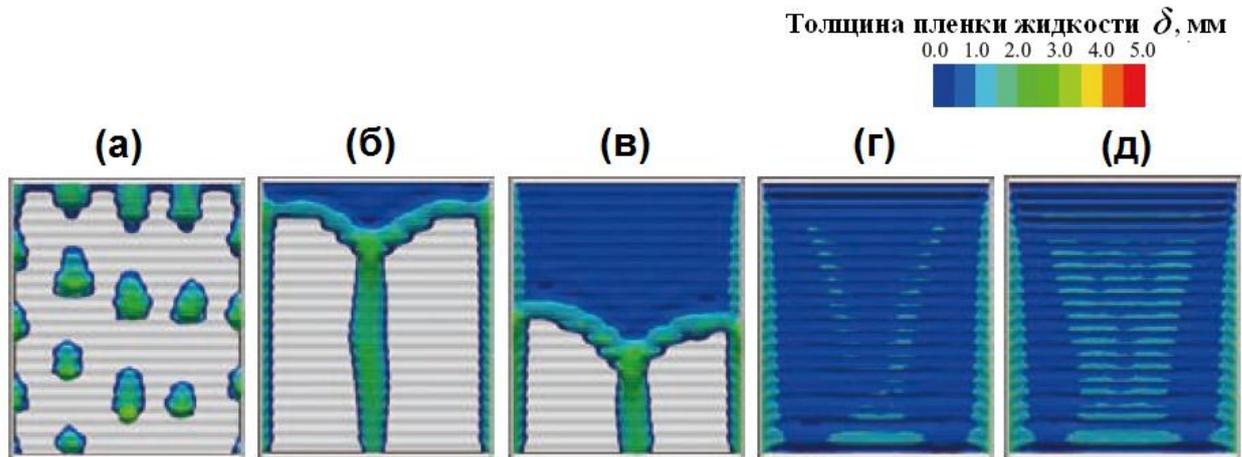


Рис. 1.10. Схема течения плёнки жидкости по гофрированной наклонной поверхности (угол наклона 60° к горизонту) при $We = 0,04$ (а); $We = 0,42$ (б); $We = 0,80$ (в); $We = 1,14$ (г); $We = 1,44$ (д) [114]

Поверхности некоторых насадок оснащены перфорацией различных форм и размеров. В работе [12] исследовался характер течения плёнки жидкости по вертикальной перфорированной пластине. При этом отмечается, что при расходах жидкости, соответствующих плёночному числу Рейнольдса $400 < Re_{пл} < 900$, наблюдается картина, представленная на рис. 1.11. Из рис. 1.11 видно, что жидкость обтекает отверстия по периметру и периодически срывается в виде капель с верхнего участка отверстий. Автор [12] отмечает, что при $Re_{пл} > 900$ вся поверхность перфорированной пластины покрыта плёнкой жидкости.

Течение жидкости по перфорированным поверхностям рассматривалось в работе [51]. Однако там не исследовался вопрос о перетекании жидкости с одной стороны пластины через отверстия на другую сторону. Один из главных выводов [51] заключается в том, что для более интенсивного перетекания жидкости с одной стороны перфорированной пластины на другую следует выбирать перфорацию в форме буквы «Ш». В

дальнейшем, использование перфорации в форме буквы «Ш» (она же зубчатая перфорация) для регулярных насадок, исследовалось в работах Марценюка [41, 42]. Автор [41] отмечает, что на зубцах последовательно образуются, растут, а затем отрываются капли жидкости. Срываясь с зубца, капля жидкости пролетает расстояние до нижнего края отверстия, где расплющивается и образует на обеих сторонах элемента насадки обособленную плёнку жидкости [42]. В работе отмечается существование капельно-плёночного режима течения жидкости, а также цепного режима течения, представляющего собой чередующееся образование капель на верхних кромках отверстий и их срыв. Для насадки из пластин с перфорацией в форме буквы «Ш», выполненной в шахматном порядке, переход к цепному режиму течения происходит при значениях линейной плотности орошения $\Gamma \approx 0,079 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$. Для гофрированной насадки с аналогичной формой и расположением отверстий смена режимов течения плёнки жидкости происходит при почти вдвое большем значении плотности орошения.

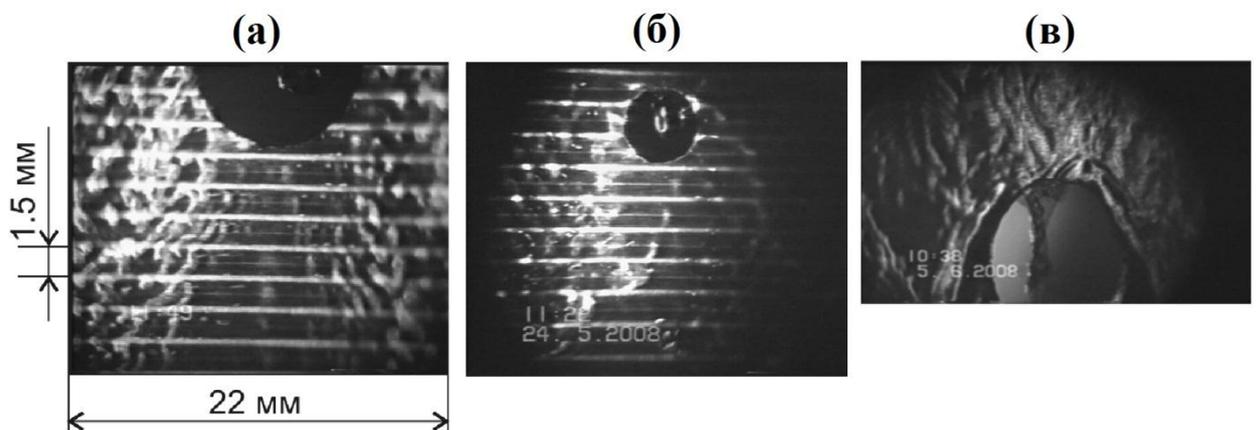


Рис. 1.11. Фотографии течения плёнки жидкости по вертикальным перфорированным пластинам; (а) – пластина с поперечным рифлением и отверстием диаметром 10 мм; (б) – пластина с поперечным рифлением и отверстием диаметром 4 мм; (в) – гладкая пластина с отверстием диаметром 10 мм [114];

В работе [65] исследовалось течение плёнки жидкости по регулярной насадке, представляющей собой вертикально подвешенные цепи. Цепи были выполнены из проволоки диаметром 2 мм и с размером звена 15x7 мм. Автор работы [65] установил, что в диапазоне $100 < Re_L < 629$, вся насадка

оказывается смоченной, а отверстия в звеньях цепи затягиваются плёнкой жидкости.

В работе [109] исследовались особенности течения плёнки жидкого азота по насадке, выполненной из гофрированных пластин. Такую геометрию имеют многие современные насадки, например, Montz B1-100, Montz A1, Montz C2-200, Flexipacs, блочная сетчатая насадка «Инжехим», серия насадок Mellapak (Mellapak 250, Mellapak 350, Mellapak 500) и др. (см. рис. 1.2). При этом измерялось количество жидкости, перетекающей через выступы гофр в нижерасположенные каналы. Плёночное число Рейнольдса в экспериментах изменялось в диапазоне $258 < Re_{пл} < 860$. Из схемы перетекания жидкости, представленной в работе [109] видно, что данная форма массообменной поверхности имеет несмоченные участки. Это приводит к неполному использованию поверхности насадки в промышленной тепломассообменной аппаратуре. В этой работе также экспериментально установлено, что при плотностях орошения, соответствующих плёночному числу Рейнольдса $Re_{пл} > 442$, лишь десятая часть подаваемой в орошаемый канал жидкости перетекает на нижележащие каналы. Из-за этого нижняя часть блока насадки может работать в условиях неполного смачивания. Теоретическое исследование процесса течения жидкостных плёнок по поверхностям схожей геометрии представлены в работе [73].

В работе [89] исследовалась теплоотдача между воздухом и плёнкой жидкости, стекающей по гладкой поверхности и по поверхности с лунками. В результате экспериментов было установлено, что при плёночном течении жидкости по поверхности со сферическими лунками интенсивность теплоотдачи выше в 1,35 ... 2,87 раза, чем при течении по гладкой поверхности. Авторы связывают это с тем, что при течении плёнки жидкости по поверхности со сферическими лунками средняя скорость течения плёнки жидкости меньше, чем на гладкой поверхности. «Наличие лунок изменяет профиль течения, турбулизирует его, приводит к образованию вихрей и пространственных бурунчиков» [89]. Отсюда следует сделать вывод, что для

увеличения интенсивности процессов контактного теплообмена на регулярных насадках, требуется оснащать поверхность насадок рифлением, впадинами, лунками и т.д.

1.5. Особенности контактного теплообмена между газом и жидкостью на насадках

В случае осуществления процессов теплообмена при непосредственном контакте (контактном теплообмене) из-за отсутствия разделяющей потока теплоносителей стенки, имеют место следующие особенности процесса теплообмена:

1) неизвестная величина поверхности теплообмена, а иногда зависящая от плотности орошения;

2) возможность потери части жидкости из-за её уноса из аппарата потоком газа;

3) более высокая интенсивность процесса теплообмена, за счет того, что гидродинамический пограничный слой в плёнке жидкости находится со стороны насадки, а тепловой – со стороны свободной поверхности²;

4) как правило, имеет место более высокая интенсивность процесса теплообмена, за счет протекания процесса массообмена³.

5) отсутствие надежных методик технологического расчета таких аппаратов. Сложность одновременного моделирования (даже на ЭВМ средствами программ вычислительной гидродинамики) процессов теплообмена, массообмена, учета смачиваемости материала насадки и т.д.

² В поверхностных теплообменных аппаратах и тепловой и гидродинамический пограничный слой образуются со стороны теплообменной поверхности. При этом непосредственно у теплообменной поверхности передача теплоты в теплоноситель происходит только за счет теплопроводности. В контактных аппаратах с насадкой, передача теплоты от газа к жидкости (или наоборот) идет через свободную поверхность плёнки жидкости, на которой скорость жидкости максимальна, и теплопередача происходит за счет конвекции на свободной поверхности плёнки жидкости.

³ Это не всегда верно. Для случая охлаждения горячих ненасыщенных парами воды газов холодной водой в противоточном аппарате на верхних слоях насадки происходят одновременно процессы нагрева воды за счет теплопередачи и охлаждения воды за счет её испарения в поток ненасыщенного газа. При этом интенсивность процесса нагрева воды остается невысокой до тех пор, пока газ не достигнет состояния насыщения. В дальнейшем, процесс нагрева жидкости газом будет являться результатом как теплообмена соприкосновением, так и конденсации водяных паров из газа.

1.5.1. Массообмен в процессе контактного теплообмена

В отличие от процессов теплообмена в поверхностных (рекуперативных) теплообменниках, в процессах контактного теплообмена между газом и жидкостью отсутствует разделяющая потоки теплоносителей стенка. Как следствие, при непосредственном соприкосновении газа и жидкости происходит передача теплоты и массы. Если температура жидкости выше температуры газа, а газ не насыщен парами этой жидкости, тогда происходит процесс контактного теплообмена между газом и жидкостью. При этом одновременно с теплообменом, протекают и процессы массообмена, заключающиеся в испарении жидкости в газ. Это также сопровождается передачей теплоты фазового перехода от газа к жидкости. Такие процессы нашли распространение, например, в градирнях при испарительном охлаждении оборотной воды. Если же газ является насыщенным парами жидкости, а его температура выше, чем температура взаимодействующей с ним жидкости, тогда при соприкосновении с этой жидкостью происходит охлаждение газа и его осушка (за счет конденсации пара из газа). Жидкость при этом нагревается как за счет конвективного теплообмена, так и за счет конденсации паров жидкости из газа. Такой процесс имеет место при утилизации теплоты конвективных сушилок, когда отработанный газ, имеющий высокую влажность и температуру, охлаждается водой в контактных аппаратах. Если же относительная влажность газа ниже 100%, то при контакте с водой, имеющей меньшую температуру, одновременно происходят процессы нагрева воды за счет конвективного теплообмена, и её охлаждения за счет массообмена. Такие процессы имеют место в контактных экономайзерах на начальном этапе взаимодействия холодной воды и горячих дымовых газов (в верхних слоях насадки в случае противоточного взаимодействия газа и жидкости). При этом газ охлаждается и насыщается влагой (при постоянной энтальпии) до состояния, при котором

влажность становится равной 100%, после чего передача теплоты к жидкости интенсифицируется за счет изменения направления массообмена.

1.5.2. Коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи

Основной задачей исследования процесса тепломассообмена в контактных теплообменных аппаратах является получение расчетного уравнения для определения коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи. Для процесса охлаждения горячих газов жидкостью в насадочных аппаратах, на практике пользуются уравнением вида [31, 55]:

$$Ki = 0,01Re_G^{0,7} \cdot Re_L^{0,7} \cdot Pr^{0,33}, \quad (1.10)$$

где Ki – критерий Кирпичева (аналог критерия Нуссельта Nu), учитывающий все виды теплообмена. Однако уравнение (1.10) обладает рядом недостатков. Так, например, оно не учитывает начальную влажность газа, смену направления массообмена по высоте колонного аппарата, и, как будет показано далее, выведено в условиях неполного смачивания слоя насадки. Зачастую вместо критерия Кирпичева пользуются обобщенным коэффициентом теплоотдачи (учитывающим все виды теплообмена) [96]. В литературе можно найти и другие данные по массообмену при контактном теплообмене. Так, например, в работе [29] для случая противоточного контакта между гравитационно-стекающей плёнкой жидкости и потоком горячего газа получено выражение для расчета коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи в критериальном виде:

$$Nu = 0,007Re_G^{0,5} \cdot Re_{пл}^{0,09} \cdot Pr^{0,33}, \quad (1.11)$$

$$Sh = 0,014Re_G^{0,6} \cdot Re_{пл}^{0,6} \cdot Sc^{0,33}. \quad (1.12)$$

Уравнения (1.11)-(1.12) выведены для зоны конденсации контактного аппарата.

Для расчета коэффициента массоотдачи от воды к воздуху при испарительном охлаждении воды используются уравнения вида [54]:

$$\frac{\beta_V}{q} = A \cdot \lambda^m, \quad (1.13)$$

или

$$Me = A \cdot h \cdot \lambda^m. \quad (1.14)$$

В формулах (1.13) и (1.14) Me – число Меркеля, $\lambda = G/L$ – относительный расход. Иногда вместо числа Меркеля в формуле (1.14) используют число испарения [27]. Показатель степени при относительном расходе λ , а также постоянный множитель A зависят от конструкции насадки. Так, например, для насадки из асбестоцементных плит [33] расчетное уравнение для определения коэффициента массоотдачи имеет вид:

$$\frac{\beta_V}{q} = 0,479 \lambda^{0,66}. \quad (1.15)$$

Для насадок из решетчатых элементов ПР50, расчетное уравнение имеет вид [33]:

$$\frac{\beta_V}{q} = 1,41 \lambda^{0,54}. \quad (1.16)$$

Для сетчатой насадки, располагаемой в противоточном аппарате горизонтально, было получено уравнение [38]:

$$\beta_V = 1,04 q^{1,04} \cdot \lambda^{0,79}. \quad (1.17)$$

При вертикальном расположении элементов этой же насадки, уравнение принимает вид:

$$\beta_V = 0,93 q^{1,02} \cdot \lambda^{0,79}. \quad (1.18)$$

Иногда, расчетное уравнение для определения коэффициента массоотдачи представляют в другом виде. Так, например, в работе [104] расчет градирни с насадкой из поливинилхлорида предлагается проводить, используя уравнение:

$$\beta_V = 2,7513 G^{0,7171} \cdot L^{0,2829}. \quad (1.19)$$

Для насадки из гофрированных асбесто-цементных щитов, установленных с зазором 15 мм там же предлагается уравнение:

$$\beta_V = 1,5413G^{0,5815} \cdot L^{0,4185}. \quad (1.20)$$

Отметим, что форма записи уравнений (1.19)-(1.20) позволяет наглядно оценивать влияние расхода каждого из теплоносителей на коэффициент массоотдачи. Также можно заметить, что сумма показателей степеней при расходе газа и расходе жидкости в уравнениях (10)-(11) равна единице. Это наблюдается для большинства насадок градирен [54]. Поэтому, такая форма записи принципиально не отличается от уравнений (1.15)-(1.16).

Следует отметить уравнения (1.11)-(1.12). В них показатель степени при плёночном числе Рейнольдса различный для значений коэффициента теплоотдачи и коэффициента массоотдачи. Объясняется это тем, что в исследуемом авторами работы [29] участке тепломассообменного аппарата, помимо участка контактного теплообмена между газом и плёнкой жидкости, по-видимому, имеется участок теплообмена между стенками несмоченного участка канала и газом. На этом участке теплообмен не сопровождается массообменом. Поэтому показатели степени при $Re_{пл}$ в уравнениях (1.11)-(1.12) сильно различаются. Иногда, неравенство поверхностей тепло- и массообмена используется, для организации больших скоростей газа и сохранения большей движущей силы массопередачи в поперечноточных насадочных градирнях. Этому посвящена работа [68], где различие площади теплообмена и массообмена учитывается модернизированным соотношением Льюиса:

$$Le \approx \frac{\alpha}{\beta \cdot c_G} \cdot \frac{f_t}{f_m}, \quad (1.21)$$

где Le – число Льюиса, f_t/f_m отношение площади насадки, участвующей в процессе теплообмена к поверхности насадки, участвующей в процессе массообмена, α – поверхностный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С), β – поверхностный коэффициент массоотдачи, кг/(с·м²), c_G – теплоемкость газа, Дж/(кг·°С). Следует отметить, что на значение коэффициента массоотдачи влияют также размеры блока насадки, количество ярусов в блоке насадки и другие факторы. Так, например, в работе [60] авторами отмечается, что на

интенсивность процесса тепломассообмена на насадках значительно влияет высота блока насадки. Экспериментально было установлено влияние высоты блока насадки на коэффициент массоотдачи на примере насадки типа «19» (см. табл. 1.2).

При обработке результатов исследования тепломассообмена в аппаратах с перекрёстным током, когда слой насадки представляет собой параллельные каналы между соседними элементами насадки, результаты экспериментов чаще всего представляют в виде критериальных уравнений. В работе Дорошенко [23] критериальное уравнение для расчета перекрёстноточных градиен с насадкой из пакета листов металлической сетки имеет вид:

$$Sh = 0,024Re_G^{0,93} \cdot Re_L^{0,34}. \quad (1.22)$$

Табл. 1.2. Значения постоянного множителя и показателя степени в уравнении (1.13) для различной высоты блока насадки типа «19» по данным работы [60]

h , м	A	m
0,91	0,911	0,6
1,22	1,202	0,6
1,52	1,301	0,54
1,83	1,504	0,52

Наиболее развернутое критериальное уравнение получено в работе [49]:

$$Sh = 0,003Re_G^{0,75} \cdot Re_{пл}^{0,6} \cdot Ku^{0,4} \left(\frac{T_G}{T_L} \right)^{0,55} \left(\frac{h_{нас}}{\Delta} \right)^{-0,3} \left(\frac{l_{нас}}{\Delta} \right)^{-0,8} Sc^{0,33}. \quad (1.23)$$

Последнее уравнение включает в себя не только расходы теплоносителей, но и учитывает размеры блока насадки и теплофизические свойства газа и жидкости.

Следует обратить внимание, что в формулах (1.15)-(1.20) и (1.22)-(1.23) коэффициент массоотдачи (или теплоотдачи) в той или иной мере зависит от расхода жидкости. Однако, из теоретических представлений о процессе контактного теплообмена между воздухом и водой, коэффициент массоотдачи не должен зависеть от расхода жидкости, так как основное сопротивление процесса сосредоточено в газовой фазе. Это отмечено еще в работе Егорова [24]. Там же отмечено, что причиной этого может служить неполное смачивание насадки при малых расходах жидкости.

1.6. Выводы из обзора литературы

На основании анализа литературных источников, было установлено, что в настоящее время разрабатывается множество конструкций регулярных насадок. Это является следствием высокой эффективности регулярных насадок и их малым гидравлическим сопротивлением по сравнению с насыпными насадками. Также в литературе можно найти множество экспериментальных работ по исследованию плёночных течений жидкостей по поверхностям регулярных насадок. Это связано с тем, что во многом интенсивность процесса тепломассообмена на насадках определяется характеристиками плёночного течения – площадью смоченной поверхности насадки, наличием волн на свободной поверхности плёнки жидкости и т.д. В то же время продолжают поиски более эффективных тепломассообменных поверхностей.

Современные регулярные насадки, в большинстве своем, представляют собой блоки из собранных под углом гофрированных листов (например, см. работы [22, 48, 60, 83, 109]). Хотя данные насадки и обладают высокой удельной поверхностью, но, как правило, работают в условиях неполного смачивания [12, 109]. Это не только затрудняет определение действительной поверхности тепломассообмена, но и является следствием неполного использования объема насадочной части аппарата. Учитывая высокую

стоимость регулярных насадок, это является следствием повышенных капитальных затрат при производстве теплообменного оборудования.

Чтобы увеличить площадь смоченной поверхности (коэффициент смачивания), можно увеличить плотность орошения (за счет уменьшения площади поперечного сечения аппарата), т.к. существует прямая связь между коэффициентом смачивания и расходом жидкости [36]. Однако это малоэффективно, так как приводит к росту скорости газа и, как следствие, гидравлического сопротивления и уноса жидкости из аппарата. Более того, уменьшать площадь сечения аппарата возможно лишь до тех пор, пока скорость газа не достигнет скорости, при которой наступает захлебывание аппарата. Кардинальным выходом из этой ситуации является организация перекрёстного (поперечного) тока в насадочном аппарате. При этом возможна компоновка блока насадки таким образом, чтобы сечение для прохода газа было больше сечения для прохода жидкости [90]. При этом можно при небольших расходах газа обеспечить достаточную плотность орошения, без увеличения скорости газа, тем самым ограничив явление уноса жидкости и не увеличивая гидравлическое сопротивление аппарата по газу. Кроме того с уменьшением длины блока насадки $l_{\text{нас}}$ можно достичь больших значений коэффициента массоотдачи (см. формулу (1.23)).

Из анализа литературных источников установлено, что одним из способов обеспечения более полного смачивания насадки является нанесение на поверхность насадки регулярной шероховатости в виде впадин, выступов, мелких гофр. Перфорация насадок позволяет обеспечить перетекание жидкости через отверстия, что приводит к более равномерному смачиванию всего насадочного объема. Однако насколько интенсивно происходит перетекание жидкости через отверстия в насадке, и как это влияет на интенсивность теплообмена в литературе не указано.

Процесс передачи теплоты при непосредственном соприкосновении газа и жидкости исследован недостаточно. Из анализа большинства теоретических работ можно сделать вывод, что процесс передачи теплоты

между газом и жидкостью при их непосредственном соприкосновении лимитируется газовой фазой. Следовательно, коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи не должны зависеть от расхода жидкости⁴. Однако, из анализа множества экспериментальных работ, в которых исследовались процессы испарительного охлаждения оборотной воды, охлаждения дымовых газов контактным способом и т.д. установлено, что коэффициенты массоотдачи и теплоотдачи в значительно большей степени зависят от расхода жидкости, чем это следует из теоретических соображений. Так, например, в рекомендуемое в работе [31] критериальное уравнение для расчета критерия Кирпичева входят Re_G и Re_L . Причем показатели степени у обоих критериев равны 0,7. По-видимому, это может быть следствием того, что эта формула была получена в условиях неполного смачивания насадки. При этом очевидно, что с увеличением расхода жидкости, будет увеличиваться не столько коэффициент массоотдачи, сколько активная поверхность массообмена. Здесь следует отметить работу [111], где авторы исследовали процесс тепломассообмена при испарительном охлаждении воды на керамической регулярной насадке. Авторами было установлено, что с увеличением расхода жидкости наблюдается рост объемного коэффициента массоотдачи до значений относительного расхода $\lambda = L/G = 1$. Учитывая отличное смачивание керамики, можно прийти к выводу, что прекращение роста коэффициента массоотдачи связано с наступлением полного смачивания насадки (что зачастую не достигается в насадках из ПВХ из-за меньшего значения краевого угла смачивания). Таким образом, из анализа литературных источников следует сделать вывод, что в настоящее время отсутствуют надежные методики расчета процессов контактного теплообмена при непосредственном соприкосновении потоков газа и жидкости. Использование результатов теоретических и экспериментальных

⁴ Очевидно, что незначительный вклад расхода жидкости в коэффициенты тепломассоотдачи все же должен присутствовать. Это связано с тем, что с увеличением расхода жидкости, увеличивается скорость плёнки жидкости на свободной поверхности. Это приводит к тому, что относительная скорость газа и жидкости в насадочном аппарате увеличивается.

исследований плёночных течений жидкости, в том числе и по поверхностям регулярных насадок, при расчете насадочных аппаратов затруднено.

1.7. Постановка задач исследования

В соответствии с поставленной целью и результатом анализа литературных данных, были сформулированы следующие задачи исследования:

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

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ГОФРИРОВАННО-ПРОСЕЧНОЙ НАСАДКИ

2.1. Конструкция и характеристики новой регулярной насадки

Основываясь на опыте использования в промышленности регулярных насадок, работающих в плёночном режиме [31, 38, 51, 66], нами была разработана конструкция регулярной, гофрировано-просечной насадки (ГПН), представленная на рис. 2.1.

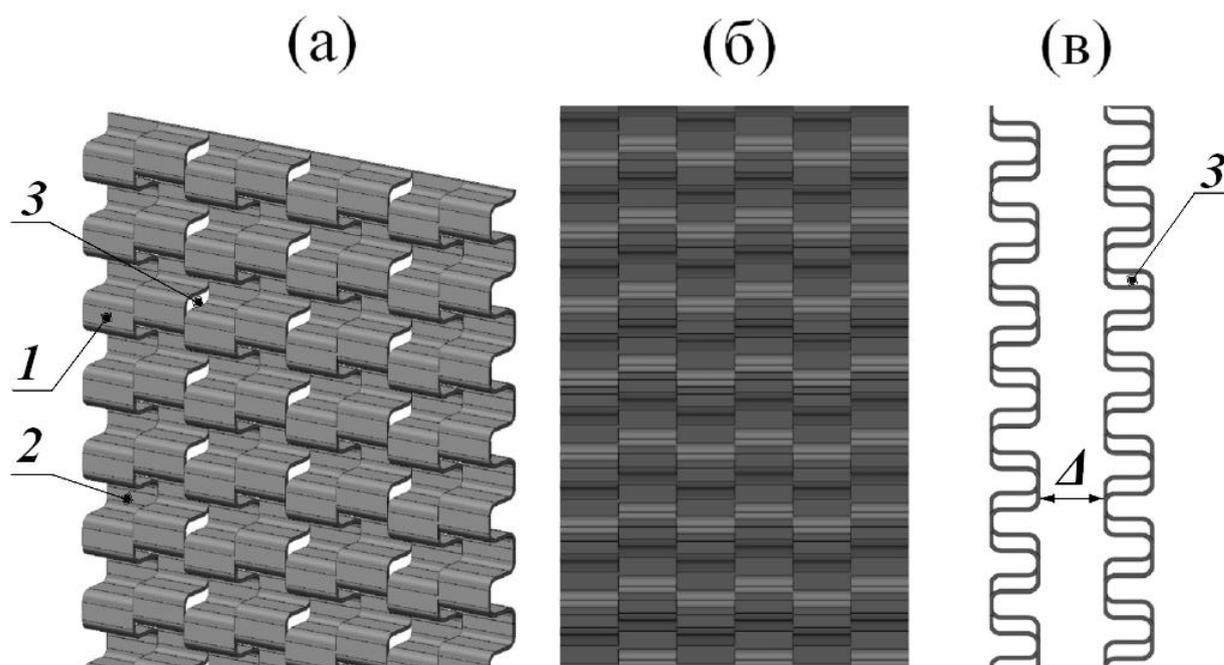


Рис. 2.1. Элемент гофрировано-просечной насадки (ГПН) в изометрии (а);
вид на элемент насадки спереди (б);
вид на блок насадки сбоку (в):
1 – выступ гофры; 2 – впадина гофры; 3 – щель;
 Δ – зазор между соседними элементами насадки в блоке

Элемент насадки представляет собой лист алюминия с выполненными на его поверхности гофрами. Гофры выполнены в несколько рядов, сдвинутых друг относительно друга. За счет сдвига между соседними в рядах гофрами образованы щели прямоугольной формы (см. рис. 2.1). Гофры

позволяют увеличить удельную поверхность насадки (по сравнению с плоской пластиной аналогичных габаритных размеров почти в 2 раза). Толщина элемента насадки s составляет 3 мм. Гофры имеют прямоугольную форму. В рамках настоящей работы элементы насадки выполнялись из алюминиево-марганцевого сплава, который характеризуется высокой коррозионной стойкостью и жаростойкостью, а также хорошо смачивается водой. Элементы насадки изготавливаются путем прокатывания заготовки (фольги толщиной 0,2 мм) между зубчатыми колесами специальной формы в три стадии. Таким образом, данная насадка может быть выполнена с достаточной точностью и низкой шероховатостью поверхности ($Ra = 1,2 \div 1,6$ мкм).

Блок предлагаемой насадки представляет собой совокупность из нескольких элементов, установленных параллельно друг относительно друга с определенным зазором Δ (см. рис. 2.2). Изменяя величину зазора между соседними элементами насадки, можно изменять удельную поверхность насадки a и свободный объем ε . Основные геометрические характеристики предлагаемой насадки представлены в табл. 2.1. Конструкция насадки защищена патентами РФ [16, 63].

Табл. 2.1. Основные характеристики ГПН-насадки

$\Delta \cdot 10^3, \text{ м}$	$d_e \cdot 10^3, \text{ м}$	$a, \text{ м}^2/\text{м}^3$	$\varepsilon, \text{ м}^3/\text{м}^3$
6	8,2	463,7	0,947
8	10	379,3	0,956
10	12	321	0,963
12	14	278,2	0,968
14	16	245,4	0,973
16	18	219,6	0,975
18	20	198,7	0,977
20	22	181,4	0,979

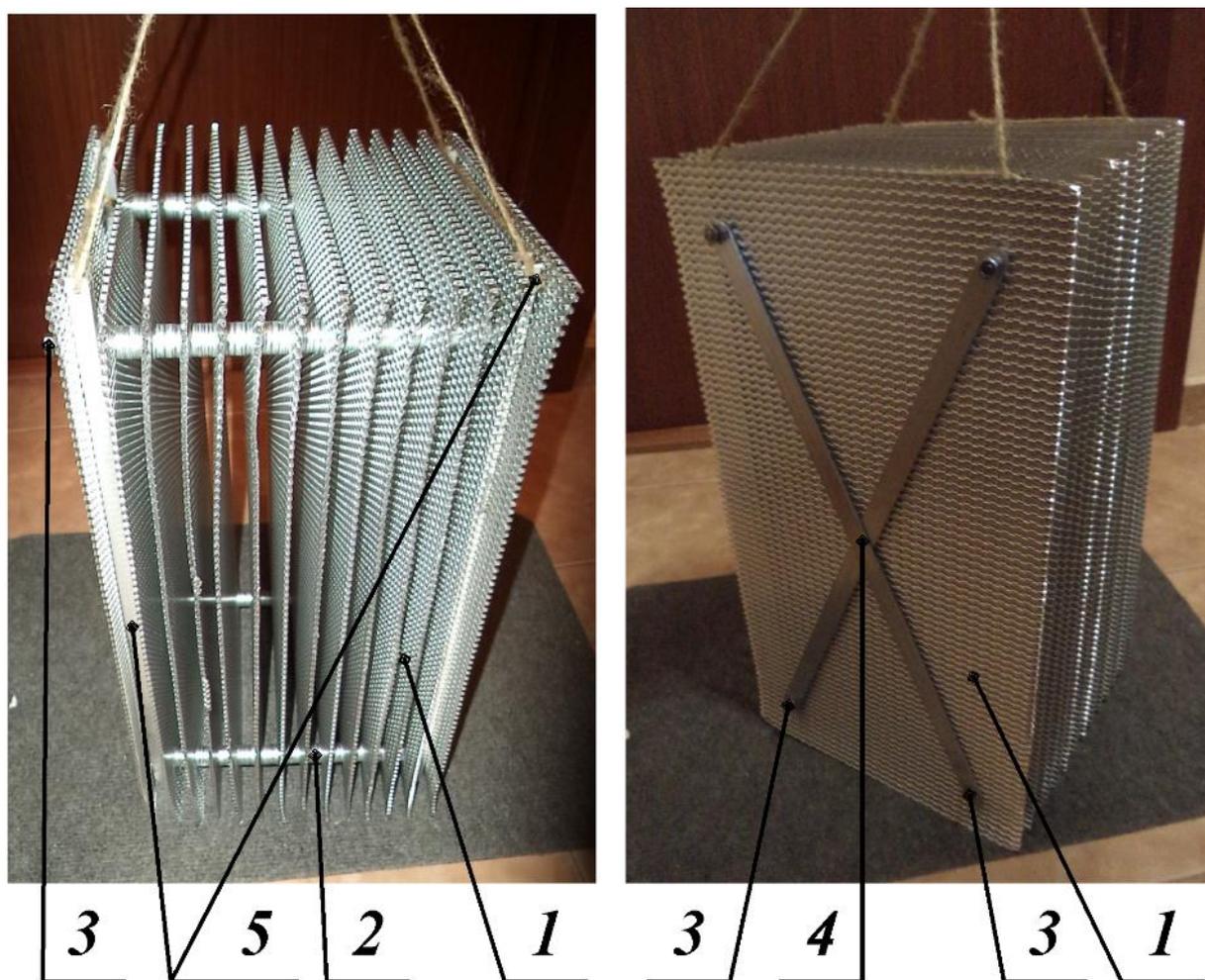


Рис. 2.2. Блок ГПН-насадки в сборе для насадочного аппарата (габаритные размеры 248x248x450 мм); 1 – элемент насадки; 2 – дистанционирующая проставка; 3 – поперечные стержни; 4 – раскосы; 5 – вертикальные распорки

2.2. Экспериментальный стенд №1 для исследования течения плёнки жидкости по единичному элементу гофрировано-просечной насадки

В соответствии с поставленными целями для исследования течения плёнки жидкости по поверхности исследуемой насадки, был создан экспериментальный стенд, представленный на рис. 2.3. При разработке стенда учитывался опыт экспериментальных установок и исследования плёночных течений по элементам других насадок или теплообменных поверхностей, таких как цепная насадка [65], насадки, представляющих собой каналы с сеточным покрытием [6], и другие насадки [12, 48, 89, 97]. В результате был изготовлен стенд, который позволял наблюдать и изучать

характер и особенности течения плёнки жидкости при подаче орошения на одну из сторон элемента насадки. Стенд состоял из рамы, в которой вертикально фиксируется элемент ГПН-насадки 1 таким образом, чтобы гофры были расположены горизонтально. Жидкость (вода) подавалась на верхний торец элемента испытываемой 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, исключая на начальном этапе орошения попадание жидкости на заднюю сторону элемента насадки. Для обеспечения равномерного плёночного орошения испытываемой насадки и исключения образования брызг перед дефлектором 3 устанавливалась заслонка 4. Стекающая с элемента насадки

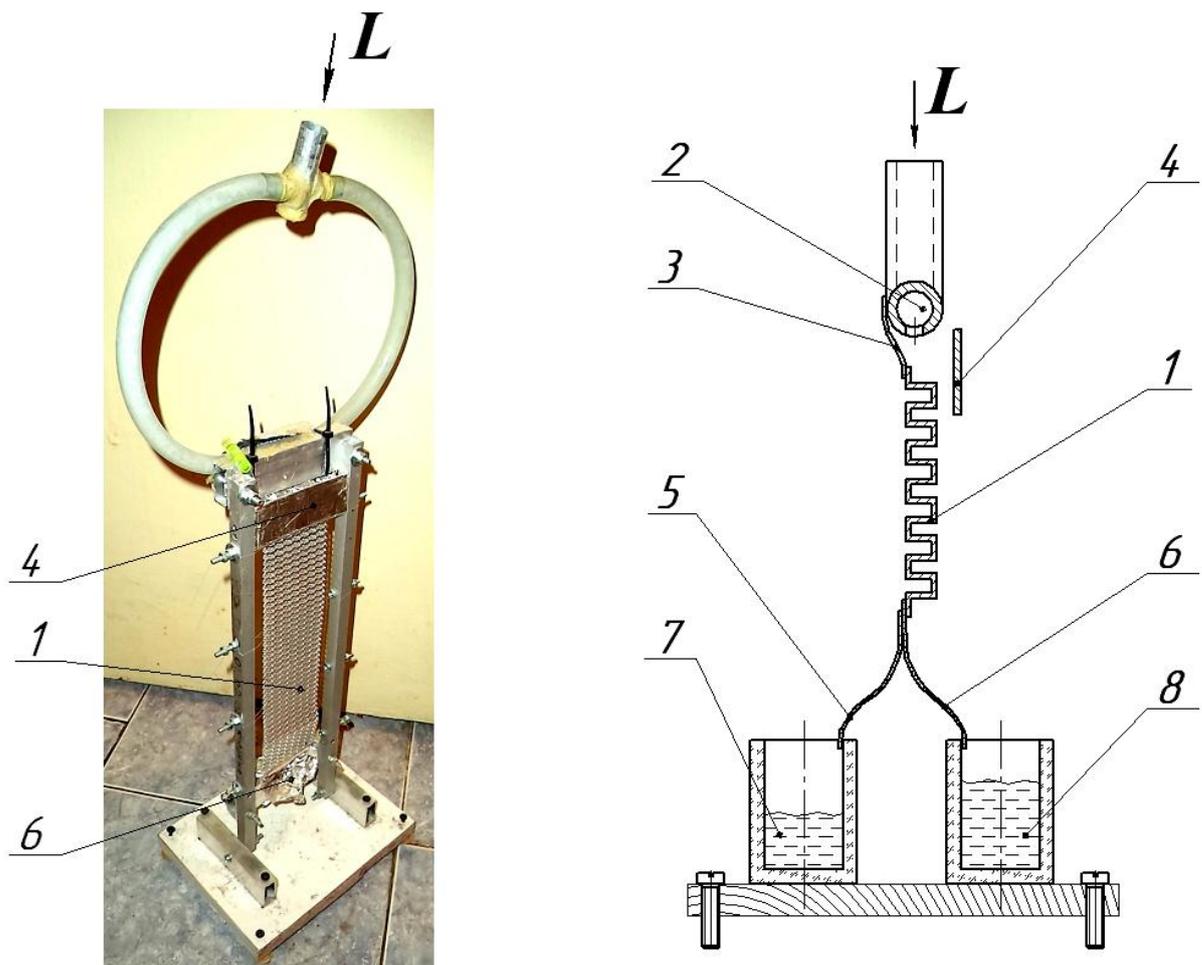


Рис. 2.3. Экспериментальный стенд №1 для исследования течения плёнки жидкости по единичному элементу гофрированно-просечной насадки при односторонней подаче орошающей жидкости (слева) и его схема (справа)

по дефлекторам 5 и 6 жидкость собиралась в мерные сосуды 7 и 8, расположенные в нижней части стенда под испытуемой насадкой. 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 высоту 250 мм, ширину 60 мм, а толщина элемента насадки составляла 3 мм.

При определении расхода жидкости время засекалось с помощью электронного секундомера. В мерных сосудах находились также спиртовые термометры для определения температуры воды. Погрешность измерения термометров не превышала ± 1 °С.

2.3. Экспериментальная установка №2 для исследования теплообмена в блоке гофрировано-просечной насадки

Экспериментальное исследование теплообмена на насадках, как правило, проводится в контактных аппаратах, заполненных насадкой [44, 56, 64, 92, 112, 113]. Для исследования теплообмена на ГПН-насадке при испарительном охлаждении воды была создана полупромышленная установка. На рис. 2.4 представлена схема этой экспериментальной установки. Установка работает следующим образом. Центробежный вентилятор 1 производительностью 1000 м³/час нагнетает воздух по воздуховоду 2 в аппарат 3. Из бака 4 центробежным насосом 5 производительностью до 6 м³/час, вода подается в верхнюю часть аппарата 3 на 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.

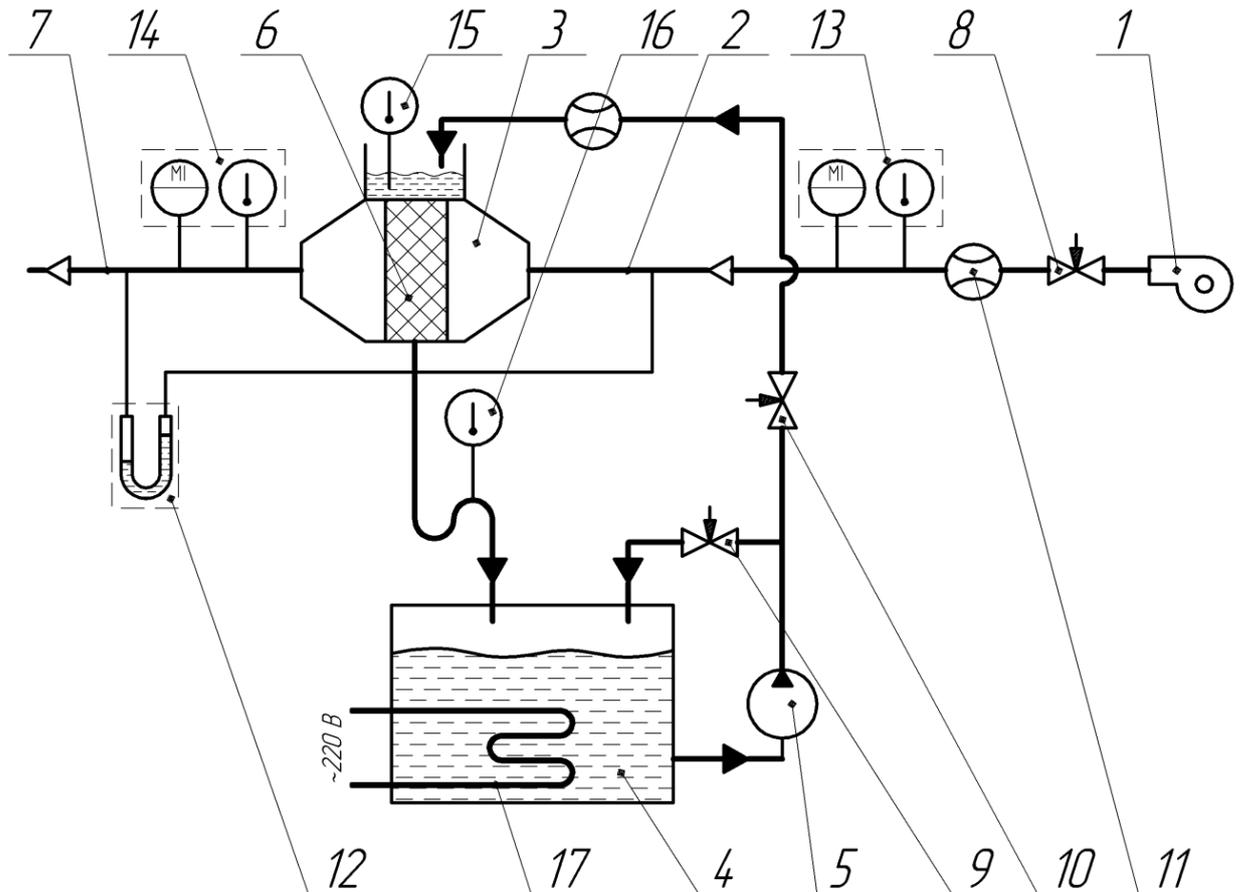


Рис. 2.4. Схема экспериментальной установки №2 для исследования тепло- и массообмена на гофрировано-просечной насадке

Динамический напор воздуха измерялся с помощью трубки Пито-Прандтля 11, подключенной к многопозиционному микроманометру ММН-2400. Расход воды измерялся водяными счетчиками VALTEC VLF-R-U(I)-15-1,5 с погрешностью измерений $\pm 2\%$ путем визуального считывания показаний. Для определения гидравлического сопротивления насадки определяли разность статических давлений в воздуховодах 2 и 7 с помощью микроманометра ММН-2400 12. Интенсивность тепломассообмена определяли путем измерения температуры и влажности воздуха на входе и выходе из насадки (датчики 13 и 14), а также путем измерения температуры воды на оросительном устройстве (датчик 15) и на выходе из аппарата (датчик 16). В опытах начальная температура воды составляла $39\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура атмосферного воздуха на входе в аппарат изменялась от 20 до 25

°С при относительной влажности от 20 до 32 %. Подогрев воды до начальной температуры осуществлялся в баке 4 с помощью трубчатого электронагревателя 17. Температура воды на входе в аппарат поддерживалась постоянной с точностью ± 1 °С. На рис. 2.5 представлена фотография экспериментальной установки.

В аппарате располагался блок насадки (см. рис. 2.6), состоящий из 11 элементов ГПН-насадки, установленных параллельно с зазором Δ друг относительно друга. В верхней части аппарата элементы насадки выходили в пазы оросительного устройства, которое представляло собой плиту с параллельными вектору средней скорости газа в аппарате пазами. В пазах



Рис. 2.5. Фотография экспериментальной установки №2 для исследования тепло- и массообмена на гофрировано-просечной насадке

оросительного устройства имелись расширения в форме сегментов круга, расположенные в шахматном порядке вдоль паза (см. рис. 2.7). При орошении, на оросительном устройстве собирался столб жидкости (см. рис. 2.8), и через расширения пазов жидкость распределялась по поверхности насадки в виде плёнки. Таким образом, исключалось образование брызг при орошении. Кроме того, это позволило обеспечивать равномерное смачивание всех элементов насадки. Высота слоя насадки в рабочей зоне аппарата составляла 437 мм. Зазор между элементами насадки в экспериментах составлял 14 и 17 мм.



Рис. 2.6. Блок ГПН-насадки в сборе

Пазы в оросительном устройстве имели ширину $c = 3$ мм, что соответствовало толщине элементов насадки. Диаметр расширений пазов, по форме представляющих собой сегменты круга, $d_{\text{отв}} = 5$ мм. Зазор между осями соседних в пазу отверстий $S = 5$ мм (см. рис. 2.7). Расстояние между

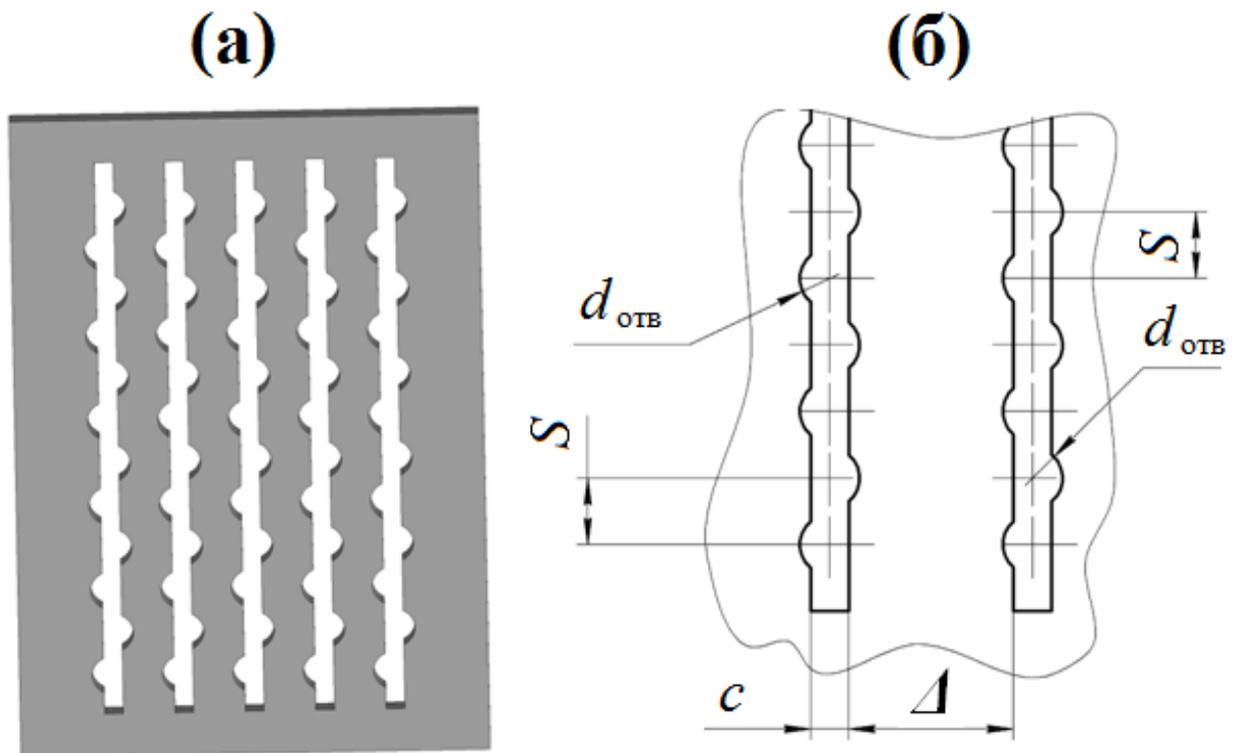


Рис. 2.7. Общий вид оросительного устройства (а);
схема расположения отверстий в нем (б)



Рис. 2.8. Образование столба жидкости на оросительном устройстве
во время проведения экспериментов

соседними пазами соответствовало зазору между элементами насадки Δ . Для фиксации элементов насадки, последние приклеивались к оросительному устройству сверху, а также клеивались снизу в опорную плиту. Последняя имела конструкцию, аналогичную оросительному устройству за исключением того, что отверстия были больше, что позволяло жидкости свободно вытекать из аппарата без образования столба жидкости на дне аппарата.

Датчики температуры воды представляли собой медные термометры сопротивления ТСМ, а влажность и температура воздуха определялись прибором КИП-20. Выходной сигнал у всех датчиков составлял 4...20 мА, что позволило выводить информацию через двухканальные измерители ТРМ200 с интерфейсом RS-485. Измерители были собраны в единый информационный щит (см. рис. 2.9).

Опыты на экспериментальной установке № 2 проводились в следующей последовательности:

- 1) Подогрев воды в баке до исходной температуры (39 °С).
- 2) Включение орошения и выдержка не менее 10 мин. для прогрева трубопроводов, аппарата и выравнивания поля температур в баке.
- 3) Включение вентилятора и продувка аппарата и воздухопроводов в течение не менее 5 мин. при скорости воздуха около 1 м/с.
- 4) Установка рабочего расхода газа и жидкости и проведение измерений.

При взаимодействии газового потока с плёнкой жидкости, стекающей по насадке, происходит сложный процесс передачи теплоты и массы. В то же время направление процесса массопередачи может изменяться на противоположное в слое насадки. Чтобы воздух не успевал насыщаться до 100% -ной влажности, эксперименты проводились на небольших длинах элементов насадки. За длину элемента насадки в условиях перекрёстного течения теплоносителей принимается размер элемента насадки,

параллельный вектору средней скорости газа в аппарате. Длина блока насадки составляла 52, 100, 150, 200 мм.



Рис. 2.9. Информационный щит с измерителями TRM200;
 левый верхний измеритель:
 сверху температура воздуха на входе T_G' ,
 снизу относительная влажность воздуха на входе X' ;
 правый верхний измеритель:
 сверху температура воздуха на выходе T_G'' ,
 снизу относительная влажность воздуха на выходе X'' ;
 нижний измеритель:
 сверху температура воды на входе T_L' ,
 снизу температура воды на выходе T_L''

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ПЛЁНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ГОФРИРОВАННО-ПРОСЕЧНОЙ НАСАДКИ

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде зависимостей на рис. 3.1 и рис. 3.2. На графике, изображенном на рис. 3.1 по оси абсцисс – линейная плотность орошения Γ . По оси ординат – количество жидкости, стекающей с задней стороны элемента насадки в единицу времени на единицу ширины элемента насадки. На графике на рис. 3.2 по оси абсцисс – плёночное число Рейнольдса $Re_{пл}$; по оси ординат – введенный автором безразмерный симплекс, названный числом перетока H . Критерий Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re_{пл} = \frac{4\Gamma}{\nu_L} = \frac{4\Gamma \cdot \rho_L}{\mu_L}. \quad (3.1)$$

Число перетока предлагается определять как отношение количества жидкости, стекающей с задней стороны элемента насадки в единицу времени к расходу жидкости, подаваемой на переднюю сторону элемента насадки:

$$H = \frac{\Gamma_{зд}}{\Gamma}. \quad (3.2)$$

Таким образом, число перетока характеризует способность насадки равномерно распределять жидкость по своей поверхности. Согласно выражению (3.2) число перетока может меняться от 0 до 1. Случай $H = 0$ соответствует крайне высокой чувствительности насадки к равномерному распределению жидкости. При этом жидкость с одной стороны элемента насадки практически не перетекает на другую. К таким насадкам, по мнению автора, относятся хордовая насадка, плоскопараллельная и другие насадки без перфорации. При использовании данных насадок следует выбирать оросительные устройства с максимальной равномерностью распределения

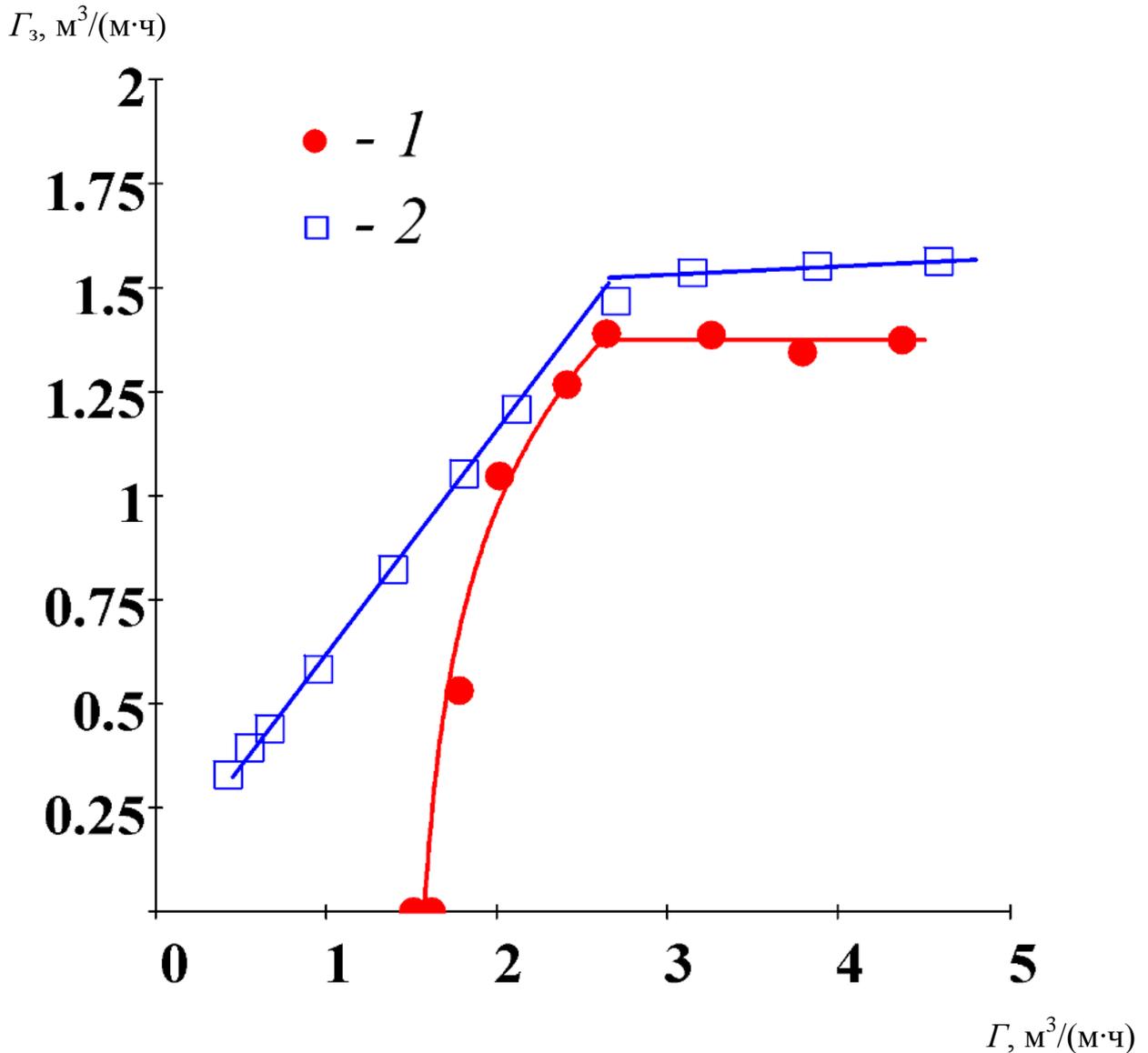


Рис. 3.1. Зависимость количества жидкости, перетекающей на противоположную сторону элемента ГПН-насадки через щели от расхода жидкости. 1 – Серия экспериментов при постепенном увеличении плотности орошения; 2 – серия экспериментов при постепенном уменьшении плотности орошения

жидкости по сечению аппарата. Если число перетока $H = 0,5$, то это означает, что насадка эффективно распределяет жидкость по своей поверхности. Такие насадки можно использовать с большинством типов существующих оросительных устройств. Случай, когда $H \approx 1$, по мнению автора, может быть в том случае, когда плоскость всех отверстий в элементах насадки образует острый угол с вектором силы тяжести. В качестве примера можно отметить насадку HОLРАСК, выполняемую из листов просечно-вытяжной

стали [95]. Из рис. 3.3 видно, что в случае подачи жидкости на правую сторону элемента насадки (см. вид (б) на рис. 3.3), создаются благоприятные условия для перетекания жидкости на левую сторону элемента насадки. Однако если жидкость будет подаваться на левую сторону элемента насадки, перетекание жидкости на правую сторону элемента насадки маловероятно. Теоретическое определение числа перетока осложнено необходимостью учета целого ряда факторов, среди которых: форма отверстий и их площадь, высота элементов насадки, режим течения плёнки

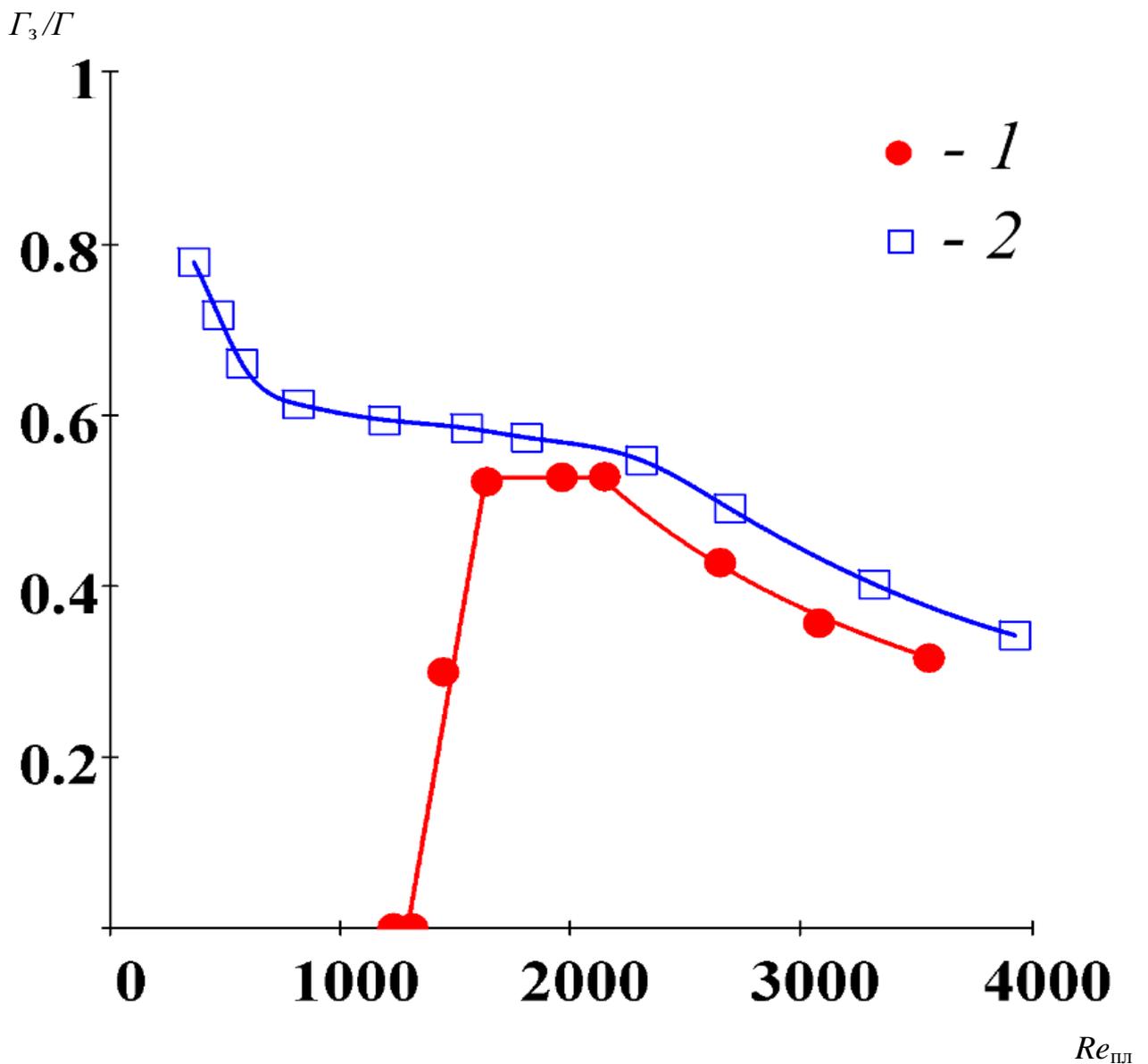


Рис. 3.2. Зависимость количества жидкости, перетекающей на противоположную сторону насадки через щели от расхода жидкости. 1 – Серия экспериментов при постепенном увеличении плотности орошения; 2 – серия экспериментов при постепенном уменьшении плотности орошения

жидкости по поверхности элемента насадки равномерность подачи орошающей жидкости, поверхностное натяжение жидкости, ориентация отверстий в пространстве и т.д.

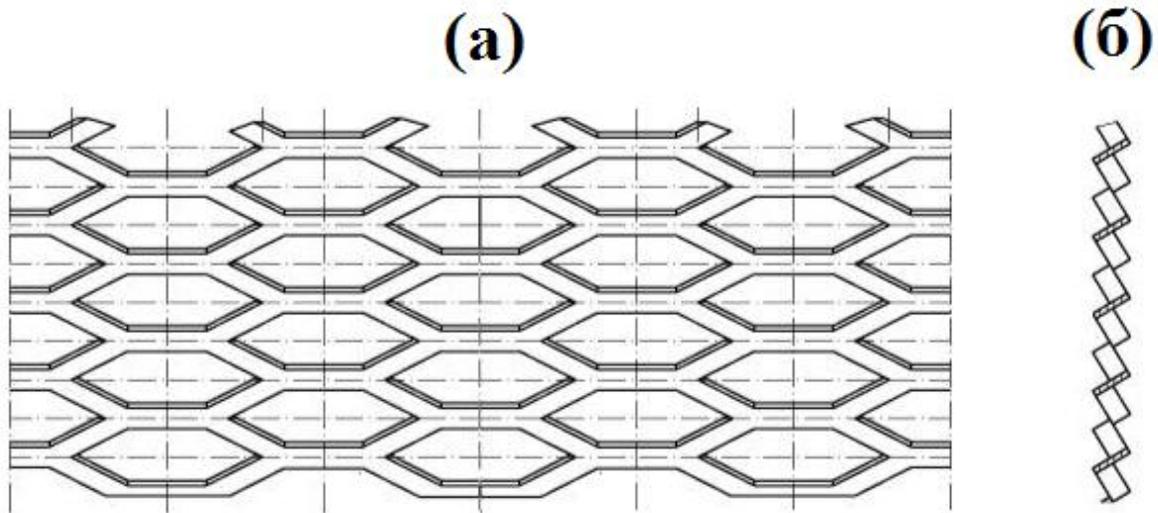


Рис. 3.3. Вид спереди на элемент насадки HOLPACK (а); вид сбоку (б) [95]

В настоящей работе проводилось две серии экспериментов. В первой серии последовательно увеличивался расход жидкости от значения, соответствующего минимальной плотности орошения (когда сторона элемента насадки, на которую подается орошающая жидкость, полностью покрывалась сплошной плёнкой жидкости) до максимальной плотности орошения (когда плёнка жидкости схватывалась с элементами рамы по бокам от элемента насадки). Результаты этой серии опытов представлены на рис. 3.1 и рис. 3.2 (кривая 1).

После этой серии опытов, проводилась вторая серия опытов, когда задняя сторона элемента насадки интенсивно орошалась жидкостью, и эксперименты повторялись при последовательном уменьшении расхода орошающей жидкости вплоть до значений, соответствующих минимальной плотности орошения. Результаты этой серии экспериментов представлены на рис. 3.1 и рис. 3.2 (кривая 2).

Из кривых (1) на рис. 3.1 и рис. 3.2 видно, что при малых плотностях орошения ($Re_{пл} < 1320$) перетекание жидкости с передней стороны элемента

насадки на заднюю не наблюдается (здесь и далее за переднюю сторону элемента насадки будем считать ту сторону, на которую первоначально подаётся орошающая жидкость). В это время с задней стороны элемента насадки в местах щелей наблюдалось образование менисков жидкости. Это свидетельствует о том, что от перетекания на заднюю сторону элемента насадки, жидкость удерживают капиллярные силы. По-видимому, инициировать перетекание жидкости на заднюю сторону можно, уменьшив величину поверхностного натяжения. Одним из способов уменьшить величину поверхностного натяжения может являться нагрев жидкости. Согласно данным работы [82], величина поверхностного натяжения прямо пропорциональна температуре жидкости. Таким образом, использование предлагаемой насадки может оказаться перспективным в аппаратах, где жидкость нагревается в результате взаимодействия с газовым потоком (например, утилизация теплоты отходящих газов конвективных сушилок, утилизация теплоты дымовых газов, абсорбция или хемосорбция с выделением теплоты и т.д.). Инициировать перетекание жидкости на заднюю сторону элемента насадки можно также за счет вибрации элемента насадки, и как будет показано далее – за счет турбулизации плёнки жидкости. Кроме того, величина краевого угла смачивания зависит от того, поступает жидкость на сухую, или на предварительно смоченную поверхность.

При значении критерия Рейнольдса $Re_{пл} \approx 1320$ наступает резкое увеличение числа перетока. По-видимому, это может быть вызвано появлением в стекающей плёнке жидкости турбулентности.

Из литературы известно [51], что турбулентный режим течения при гравитационном стекании плёнки жидкости по вертикальной поверхности наступает при условии $Re_{пл} > 1600$. В то же время исследователи [52] сходятся во мнении, что с увеличением высоты выступов шероховатости, критическое число Рейнольдса, соответствующее переходу от ламинарного (ламинарно-волнового) режима течения к турбулентному уменьшается. На исследуемой насадке высота гофр равна 2,8 мм, что позволяет рассматривать

гофры на данной насадке как крупномасштабную регулярную шероховатость. Это позволяет предположить, что наступление турбулентного режима течения на данной насадке должно произойти при меньшем значении $Re_{пл}$, чем на гладкой вертикальной поверхности. Развитие турбулентности в плёнке жидкости вызывает поперечные флуктуации вектора скорости. Это приводит к периодическим увеличениям динамического давления на мениски жидкости в щелях со стороны стекающей плёнки жидкости. Под действием поперечных флуктуаций вектора скорости, мениск жидкости в одной из щелей продавливается, и жидкость через эту щель начинает перетекать на заднюю сторону элемента насадки единичной струей. Схема механизма перетекания жидкости на заднюю сторону элемента насадки показана на рис. 3.4.

Стекая на каждую нижележащую впадину гофр по задней стороне элемента насадки, струя жидкости схватывается с менисками жидкости в щелях и таким образом, через эти мениски также начинает перетекать жидкость на заднюю сторону элемента насадки. Как видно из рис. 2.1 каждая впадина гофр соседствует с четырьмя щелями. Процесс перетекания плёнки жидкости с одной стороны элемента насадки на другую нарастает лавинообразно, что видно из кривой 1 на рис. 3.2.

При дальнейшем увеличении плотности орошения Γ выше $2 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$ ($Re_{пл} \approx 1650$) рост количества жидкости, перетекающей на заднюю сторону элемента ГПН-насадки, начинает уменьшаться (см. рис. 3.1). Увеличение плотности орошения Γ приводит к тому, что все большее количество щелей в рассматриваемой насадке начинают пропускать жидкость на заднюю сторону. При этом все большая часть задней стороны элемента насадки с увеличением расхода покрывается плёнкой жидкости. При плотности орошения около $2,7 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$ ($Re_{пл} \approx 2200$) рост количества жидкости, перетекающей на заднюю сторону элемента насадки, прекращается (см. рис. 3.1). Количество жидкости, перетекающее на заднюю сторону элемента насадки, становится постоянным и равным $\Gamma_3 = 1,37 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$. Это

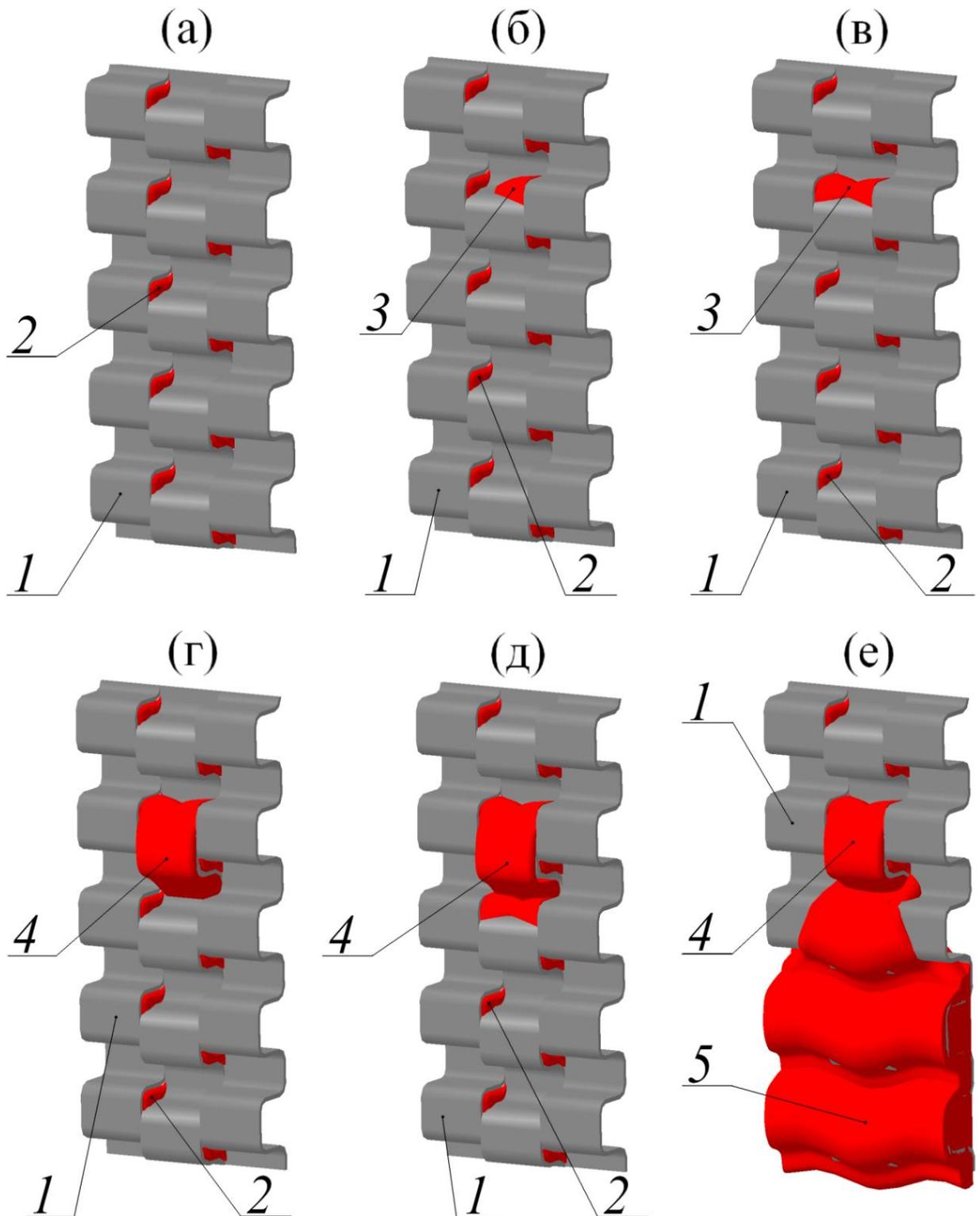


Рис. 3.4. Стадии механизма перетекания жидкости на заднюю сторону элемента насадки: (а) – исходное состояние; (б) – продавливание мениска жидкости и образование капли на задней стороне элемента насадки; (в) – увеличение объема капли и схватывание её с мениском жидкости в соседней щели; (г) – увеличение 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

критическое количество жидкости $\Gamma_{кр}$ очевидно зависит от ширины элемента насадки. Это является следствием того, что с увеличением ширины элемента насадки прямо пропорционально увеличивается количество щелей, через которые может перетекать жидкость. Таким образом, приняв, что существует линейная зависимость между величиной $\Gamma_{кр}$ и шириной элемента насадки b_n , можно получить выражение для расчета критического значения количества жидкости, перетекающей на заднюю сторону элемента насадки в виде:

$$\Gamma_{кр} = 22,9b_{нас}, \quad (3.3)$$

где множитель 22,9 представляет собой отношение критического количества жидкости, перетекающего на заднюю сторону элемента насадки в экспериментах автора ($\Gamma_{зд} = 1,37 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$) к ширине элемента насадки в тех же экспериментах ($b_n = 0,06 \text{ м}$).

В проведенных опытах экспериментально установлено наличие трех режимов течения плёнки жидкости по поверхности предлагаемой насадки. При значении критерия Рейнольдса $Re_{пл} < 1320$ жидкость стекает в виде плёнки по передней стороне элемента насадки. Перетекание жидкости на заднюю сторону элемента насадки не наблюдается. Следует отметить, что в рассматриваемом диапазоне значений критерия Рейнольдса $Re_{пл}$ плёнка жидкости покрыта волнами (см. рис. 3.5). Профиль этих волн напоминает синусоиды с различной амплитудой A , но с одинаковой длиной волны λ (см. рис. 3.6 а). Длина волны λ для обычных гравитационных волн, образующихся при течении плёнки жидкости по гладкой вертикальной поверхности, представляет собой расстояние между выступами гребней двух стекающих друг за другом волн. Величина λ зависит от критерия Рейнольдса жидкости и с увеличением последнего уменьшается [84]. В то же время на предлагаемой насадке волны имеют совершенно иную природу. Форма и амплитуда волн, образующихся на поверхности испытуемой насадки, определяется профилем поверхности, по которой они стекают. Такие волны называются «стоячими» [84] и их длина волны λ не изменяется с изменением расхода орошающей жидкости. Увеличение расхода орошающей жидкости в этом случае

сказывается лишь на уменьшении амплитуды волн A (см. рис. 3.6) и увеличении скорости течения плёнки жидкости. Этот режим течения можно охарактеризовать как режим течения со стоячими волнами на одной стороне элемента насадки (далее будем называть его первым режимом течения).

При числах Рейнольдса $1320 < Re_{пл} < 2200$ возникает другой режим течения, начинающийся с резкого увеличения числа перетока H от нуля до максимального значения. При этом обе стороны элемента насадки покрываются плёнкой жидкости со «стоячими волнами» (см. рис. 3.6 б). Этот режим течения плёнки жидкости по поверхности предлагаемой насадки назван авторами двухсторонним режимом течения со стоячими волнами или турбулентным режимом, так как причиной увеличения числа перетока H является появление турбулентности в гравитационно-стекающей плёнке жидкости (далее будем называть его вторым режимом течения).

Следующий режим течения наступает при значении числа Рейнольдса $Re_{пл} > 2200$. При этом режиме течения количество жидкости, перетекающей на заднюю сторону элемента насадки, становится постоянным. При этом режиме течения следует отметить, что задняя сторона элемента насадки по-прежнему покрыта плёнкой жидкости со «стоячими волнами». На плёнке жидкости с передней стороны элемента насадки «стоячие волны» отсутствуют. По-видимому, это

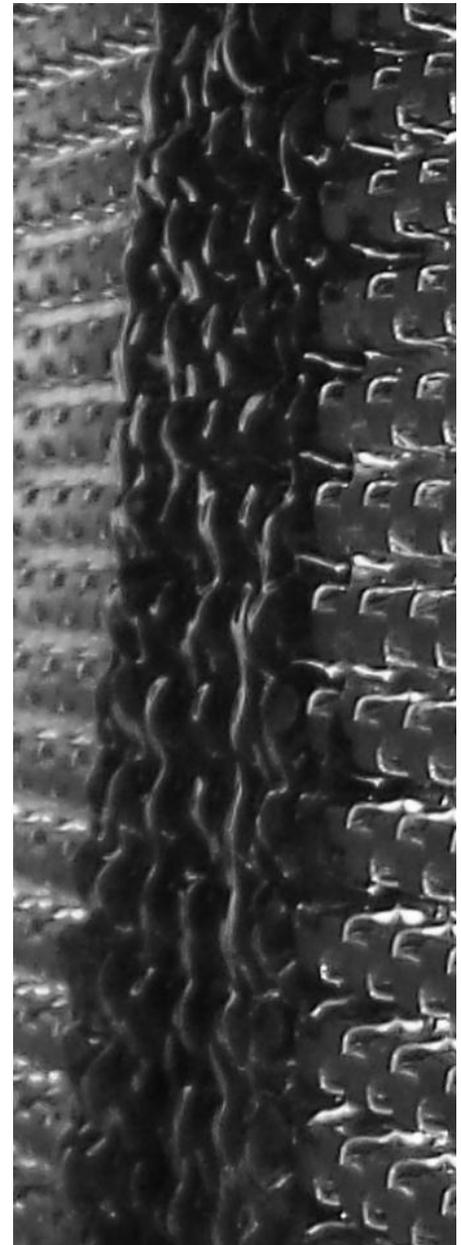


Рис. 3.5. Фотография течения плёнки воды со стоячими волнами на поверхности предлагаемой насадки

явление связано с тем, что с увеличением плотности орошения уменьшается амплитуда стоячих волн вплоть до нуля. По-видимому, это связано с опережающим ростом толщины плёнки жидкости во впадинах гофр, по отношению к толщине плёнки жидкости на выступах гофр, при увеличении расхода жидкости. Это можно проследить по формулам (1.6) и (1.7).

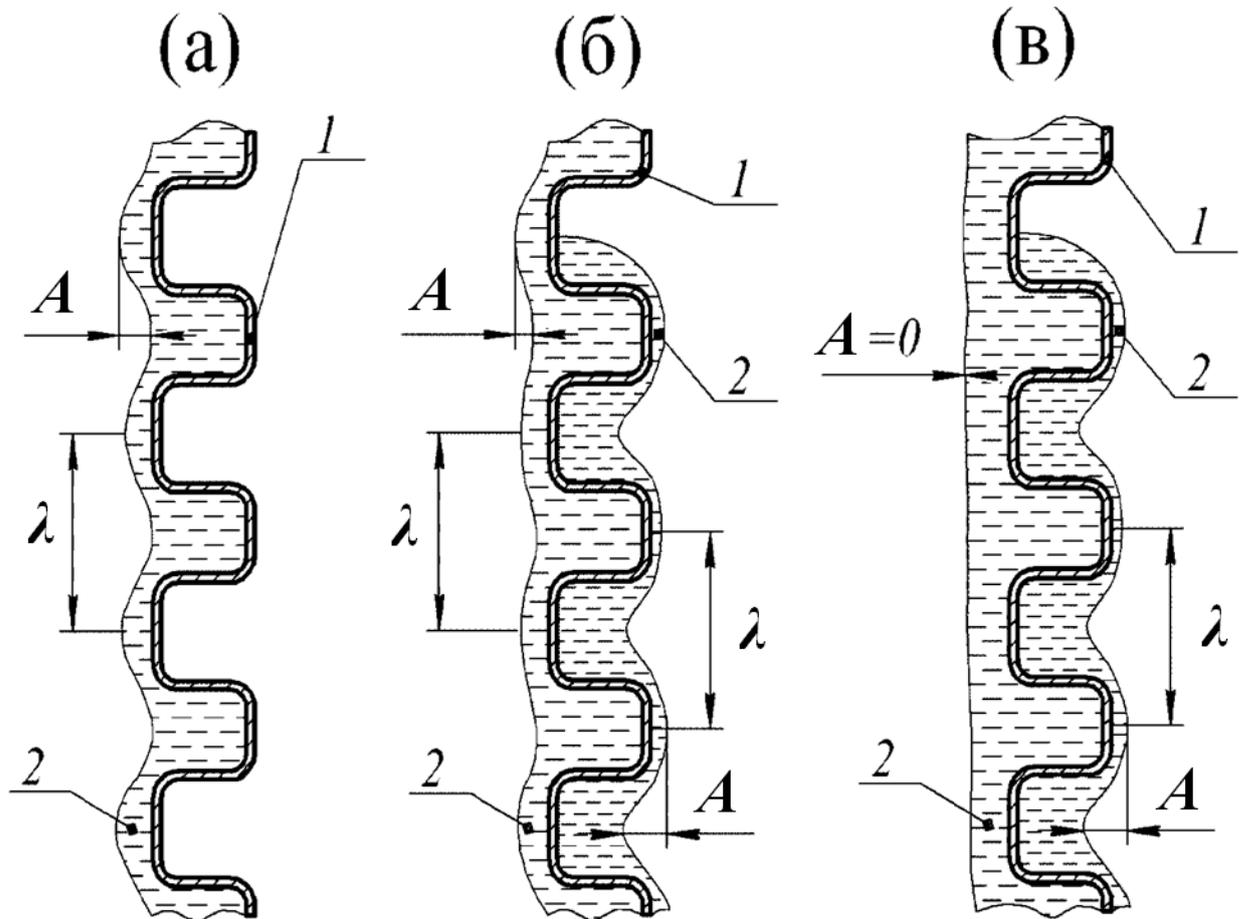


Рис. 3.6. Режимы течения плёнки жидкости по предлагаемой насадке при подаче орошающей жидкости на одну сторону элемента насадки (на левую): (а) – односторонний режим течения со стоячими волнами; (б) – двухсторонний режим течения со стоячими волнами; (в) – течение с избыточным орошением. 1 – элемент насадки; 2 – плёнка жидкости

Несмотря на то, что в формулах (1.6) и (1.7) отсутствует характерный размер гофр, а в материалах работы [59] отсутствует информация об их форме и размерах, данные формулы показывают, что толщина плёнки жидкости на выступах гофр с ростом расхода жидкости увеличивается медленнее, чем во впадинах гофр. Амплитуда стоячих волн может быть выражена через толщину плёнки жидкости:

$$A = \delta_v - \delta_p - h_{тф}. \quad (3.4)$$

Формулы (1.6), (1.7) и (3.4) подтверждают, что с ростом расхода орошающей жидкости, амплитуда стоячих волн должна уменьшаться.

Дальнейшее увеличение плотности орошения приводит к увеличению толщины плёнки жидкости и появлению крупных струй, которые с большой скоростью гравитационно движутся вниз по поверхности плёнки жидкости. Эти струи не попадают в щели, так как движутся по прямой преимущественно вертикально вниз, в то время как при малых плотностях орошения, жидкость в плёнке движется вертикально вниз по синусоидальной траектории, огибая выступы гофр элемента насадки. Данный режим назван авторами режимом с избыточным орошением (третий режим течения).

Сравнивая между собой три режима гравитационного течения плёнки жидкости по поверхности предлагаемой насадки, по мнению автора следует считать второй режим течения наиболее рациональным для проведения процессов тепломассообмена на данной насадке. Второй режим течения характеризуется большей площадью свободной поверхности плёнки жидкости, а, следовательно, и активной поверхности тепломассообмена. В работе [114] средствами компьютерных программ вычислительной гидродинамики (CFD) установлено значительное влияние на активную поверхность плоских и гофрированных насадок их предварительного смачивания. Для оценки возможности расширения границ второго режима течения на предлагаемой насадке была проведена вторая серия опытов при последовательном уменьшении расхода орошающей жидкости от максимального значения до нуля. Во второй серии опытов при уменьшении плотности орошения Γ (кривая 2 на рис. 3.1 и рис. 3.2), было установлено, что после интенсивного орошения задней стороны элемента насадки (вплоть до полного смачивания), число перетока увеличивается всего на 5%. Из рис. 3.2 видно, что в области чисел Рейнольдса $1650 < Re_{пл} < 3050$ различие в кривых 1 и 2 незначительно и обусловлено тем, что после интенсивного орошения задней стороны элемента насадки вся задняя

поверхность элемента насадки оказывается смоченной, и, соответственно, жидкость перетекает на заднюю сторону элемента насадки через все щели. Поэтому число перетока H в области $1650 < Re_{пл} < 3050$ оказалось в среднем на 5% больше во второй серии опытов (кривая 2 на рис. 3.2) чем в первой (кривая 1 на рис. 3.2) при одном и том же числе Рейнольдса $Re_{пл}$.

При значении критерия Рейнольдса $Re_{пл} < 1400$ можно наблюдать значительное расхождение кривых 1 и 2 на рис. 3.2. Уменьшение расхода орошающей жидкости приводит к росту числа перетока (см. кривая 2 на рис. 3.2). Из кривой 2 на рис. 3.1 видно, что зависимость $\Gamma_3 = f(I)$ представляет собой прямую с резко меняющимся углом наклона. Изменение угла наклона происходит при значении $Re_{пл} \approx 2200$, т.е. при переходе от третьего режима течения ко второму. Поскольку с уменьшением плёночного числа Рейнольдса $Re_{пл}$ увеличивается число перетока H , то очевидно, что первый режим течения на данной насадке не проявляется при уменьшении плотности орошения.

Основные результаты и выводы к главе 3

Для оценки способности регулярной насадки равномерно распределять жидкость в поперечном сечении аппарата с насадкой предложено использовать симплекс, равный отношению $\Gamma_{зд} / \Gamma$.

Установлен сложный многостадийный механизм перетекания жидкости через щели в насадке. Перетекание жидкости через щели в насадке наступает при достижении плотности орошения, соответствующей плёночному числу Рейнольдса $Re_{пл} = 1320$.

При $Re_{пл} < 1650$ количество жидкости, перетекающей через щели, зависит от предварительного смачивания поверхности насадки.

Для ГПН-насадки экспериментально установлена зависимость числа перетока от критерия Рейнольдса, показывающая, что использование данной насадки в промышленной тепломассообменной аппаратуре наиболее

рационально проводить при значении плёночного числа Рейнольдса в диапазоне $1320 < Re_{пл} < 2200$, что обеспечивает максимальную поверхность теплообмена. Это относится преимущественно к аппаратам, в которых основное сопротивление процессу теплообмена сосредоточено в газовой фазе (например, градирни, контактные экономайзеры, абсорберы для хорошо растворимых газов и т.д.).

Так как основное сопротивление процессу теплообмена при контактном теплообмене сосредоточено в газовой фазе, то для наиболее полного использования насадочного объема контактного аппарата, рекомендуется проводить процесс при минимальных плотностях орошения и при полном смачивании насадки. При этом, в промышленной теплообменной аппаратуре с ГПН-насадкой можно рекомендовать предварительное смачивание слоя насадки путем его кратковременного затопления, что позволит интенсифицировать переток жидкости через щели.

Представленные в данной главе результаты исследований по особенностям плёночного течения жидкости по ГПН-насадке представлены в работах [17, 99, 100], а также в трудах отечественных и международных конференций.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ БЛОКА РЕГУЛЯРНОЙ ГОФРИРОВАННО-ПРОСЕЧНОЙ НАСАДКИ

4.1. Методика обработки результатов эксперимента

Основной целью экспериментальных исследований блока регулярной насадки для газожидкостных теплообменных процессов, является получение расчетного уравнения для определения коэффициента массоотдачи. В результате анализа литературных источников для случая испарения плёнки жидкости в поток газа можно выделить две методики обработки результатов экспериментов:

- 1) Обработка результатов экспериментов по методике градирни.
- 2) Обработка результатов экспериментов по методике теплообменника.

Первая методика нашла распространение для градирен, в первую очередь в энергетике. Обработка результатов экспериментов по этой методике, подразумевает установление зависимости между величиной объемного коэффициента массоотдачи β_V от относительного расхода теплоносителей $\lambda = G/L$ [54]. Чаще всего зависимость между коэффициентом массоотдачи и относительным расходом представляют в виде зависимости [54]:

$$\frac{\beta_V}{q} = f(\lambda), \quad (4.1)$$

где q – объемная плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Иногда, особенно в зарубежной литературе, пользуются критерием Меркеля Me [43]. При этом, результаты экспериментов представляют в виде критериального уравнения вида:

$$Me = f(\lambda). \quad (4.2)$$

Зависимости (4.1) и (4.2) в логарифмических координатах для градири представляет собой прямую линию [54]. Коэффициент теплоотдачи находят из аналогии Льюиса в виде:

$$\alpha = \beta \cdot C_G. \quad (4.3)$$

Вторая методика обработки результатов экспериментов, нашедшая распространение для контактных теплообменников [29, 32, 55, 75], подразумевает установление зависимости величины поверхностного коэффициента массоотдачи β_f от безразмерных критериев подобия, таких как Re_G , Re_L и т.д., При этом коэффициент массоотдачи, как правило, входит в критерий Шервуда (диффузионный критерий Нуссельта). Результаты экспериментов представляют в виде критериального уравнения вида:

$$Sh = f(Re_G, Re_L, \dots). \quad (4.4)$$

Коэффициент теплоотдачи иногда находят через критериальное уравнение вида [29, 49, 50]:

$$Nu = f(Re_G, Re_L, \dots), \quad (4.5)$$

либо находят через аналогию Льюиса [38, 54], пользуясь уравнением (4.3) либо уравнением:

$$\alpha = \rho_G \cdot C_G \cdot \beta_f \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{0,5}. \quad (4.6)$$

В настоящей работе обработка результатов эксперимента производилась по обеим методикам. По каждой из этих методик исследование процесса контактного теплообмена связано с определением параметров влажного воздуха. В настоящей работе в результате проведения экспериментов были непосредственно получены данные о температуре воздуха по сухому термометру и относительной влажности воздуха на входе и на выходе из аппарата, а также данные о температуре воды на входе и выходе из аппарата. При обработке экспериментальных данных теплофизические свойства воды и воздуха принимались при среднем арифметическом значении определяющих величин (влажности и

температуры). При обработке результатов экспериментов, течение газа в блоке насадки рассматривалось условно как противоточное. Парциальное давление водяного пара в воздухе определялось по эмпирической формуле [72]:

$$P_{\text{пар}} = 1000e^{\frac{16,57T_G - 115,72}{233,77 + 0,997T_G}}. \quad (4.7)$$

Влагосодержание воздуха определялось по формуле [38]:

$$X = 0,622 \frac{\varphi \cdot P_{\text{пар}}}{P_{\text{атм}} - \varphi \cdot P_{\text{пар}}}. \quad (4.8)$$

Энтальпия воздуха i_G определялась по формуле [72]:

$$i_G = 1005T_G + (r + C_{\text{пар}} \cdot T_G)X. \quad (4.9)$$

Удельная теплота парообразования r определялась по формуле [72]:

$$r = (2501 - 2,36T_G) \cdot 10^3. \quad (4.10)$$

Количество переданной массы определяли по уравнению материального баланса влаги:

$$M = G(X'' - X'). \quad (4.11)$$

В качестве средней движущей силы массообмена была выбрана разность влагосодержаний ΔX , определяемая по уравнению:

$$\Delta X = \frac{(X_{\text{н}}'' - X_{\text{г}}') + (X_{\text{н}}' - X_{\text{г}}'')}{2}. \quad (4.12)$$

Объемный коэффициент массоотдачи β_V определяется по уравнению:

$$\beta_V = \frac{M}{V_{\text{нас}} \cdot \Delta X}. \quad (4.13)$$

Поверхностный коэффициент массоотдачи β_f определяли по уравнению:

$$\beta_f = \frac{M}{a_{\text{нас}} \cdot V_{\text{нас}} \cdot \Delta X \cdot \rho_G}. \quad (4.14)$$

В качестве линейного размера в критерии Шервуда (диффузионное число Нуссельта) был выбран эквивалентный диаметр канала насадки d_e . В этом случае критерий Шервуда определяется по формуле:

$$Sh = \frac{\beta_f \cdot d_e}{D}. \quad (4.15)$$

Критерий Рейнольдса газа для слоя насадки определяется по формуле [62]:

$$Re_G = \frac{4w}{a_{нас} \cdot \nu_G}. \quad (4.16)$$

В качестве безразмерного критерия, учитывающего расход жидкости, было выбрано плёночное число Рейнольдса $Re_{пл}$. Это позволило проводить параллели между экспериментами, проводимыми на стенде №1 (см. главу 3) и экспериментальной установке №2. Плёночное число Рейнольдса $Re_{пл}$ определяли по формуле (3.1). При этом, линейная плотность орошения определяется по формуле:

$$\Gamma = \frac{L}{11 \cdot 2b_{нас}}, \quad (4.17)$$

где число 11 в знаменателе обозначает количество элементов насадки по ширине аппарата, а 2 учитывает, что жидкость подается на обе стороны элементов насадки.

4.2. Результаты экспериментальных исследований

Из-за недостатка опубликованных в литературе результатов экспериментальных исследований целью первых двух серий экспериментов было выявление особенностей гидродинамики и теплообмена на ГПН-насадке в условиях перекрёстного тока. В первой серии экспериментов при постоянных значениях расхода жидкости изменялся расход газа (возрастал).

Длина блока насадки составляла $l_{\text{нас}} = 100$ мм, а зазор между элементами насадки $\Delta = 14$ мм. Результаты этой серии экспериментов для шести различных расходов жидкости представлены на рис. 4.1 в виде зависимости критерия Шервуда от критерия Рейнольдса газа. Из графика видно, что с увеличением скорости газа до значений числа Рейнольдса газа около 2500, расход жидкости практически не влияет на интенсивность массообмена на исследуемой насадке. Для подтверждения этого вывода была проведена вторая серия экспериментов, в которой при постоянном расходе газа изменялась величина плотности орошения (возрастала). Результаты этой серии представлены на рис. 4.2 в виде зависимости критерия Шервуда от

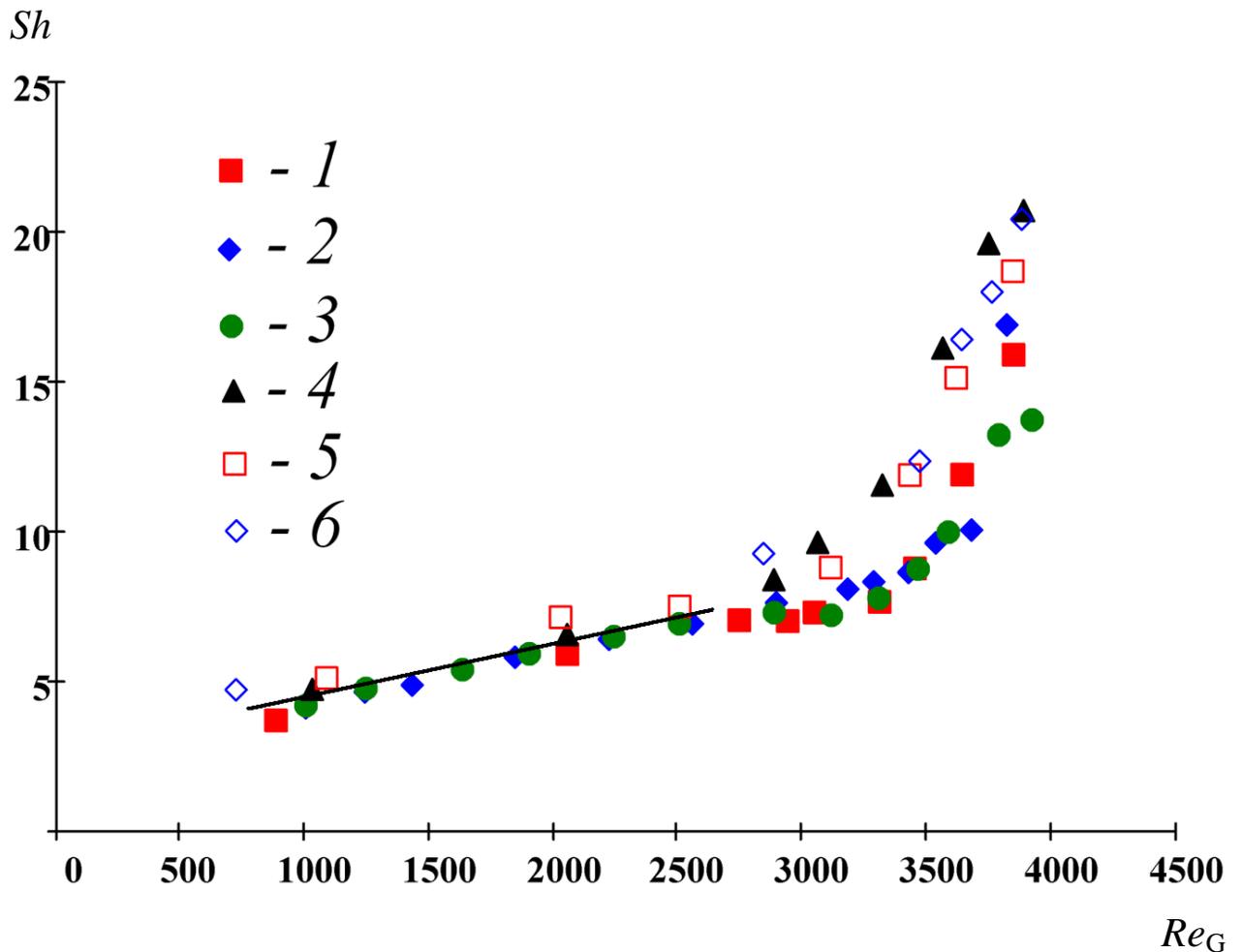


Рис. 4.1. Зависимость критерия Шервуда от критерия Рейнольдса газа
 1 – $Re_{\text{пл}} = 321$, $q = 19 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 2 – $Re_{\text{пл}} = 683$, $q = 40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;
 3 – $Re_{\text{пл}} = 1037$, $q = 60 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 4 – $Re_{\text{пл}} = 1566$, $q = 92 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;
 5 – $Re_{\text{пл}} = 1917$, $q = 112 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 6 – $Re_{\text{пл}} = 3321$, $q = 194 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

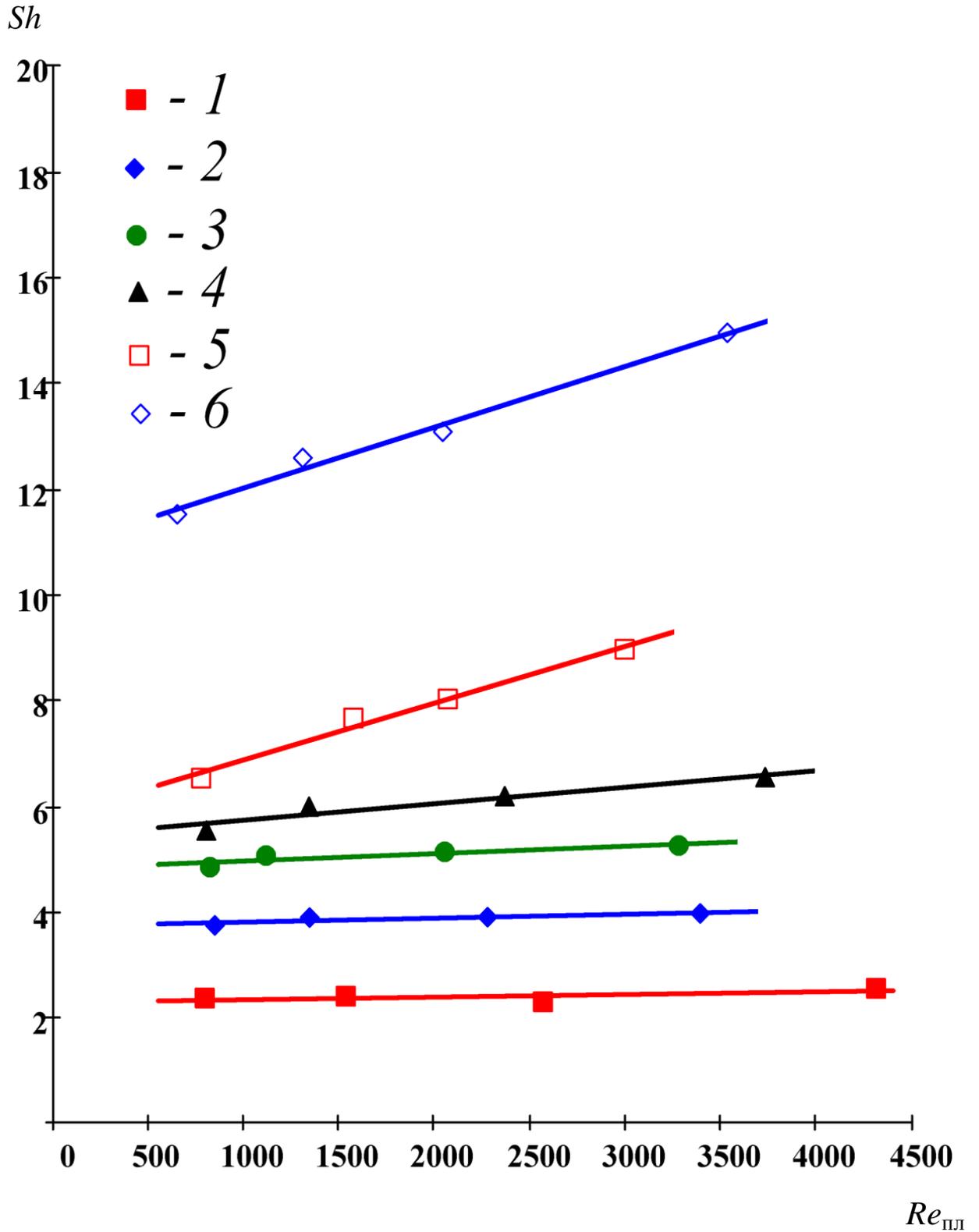


Рис. 4.2. Зависимость критерия Шервуда от плёночного числа Рейнольдса

1 – $Re_G = 510$, $w = 0,51$ м/с; 2 – $Re_G = 1289$, $w = 1,3$ м/с;

3 – $Re_G = 1947$, $w = 1,96$ м/с; 4 – $Re_G = 2645$, $w = 2,66$ м/с;

5 – $Re_G = 3178$, $w = 3,19$ м/с; 6 – $Re_G = 3646$, $w = 3,63$ м/с

плёночного числа Рейнольдса для шести различных значений расхода газа. Из анализа графика на рис. 4.2 можно также прийти к выводу, что при скоростях газа, соответствующих числу Рейнольдса газа $Re_G < 2500$, коэффициент массоотдачи практически не изменяется с изменением расхода жидкости.

Отсутствие влияния расхода жидкости на величину коэффициента массоотдачи можно объяснить следующим образом. Коэффициент массоотдачи в процессах контактного теплообмена лимитируется газовой фазой, а потому с увеличением расхода жидкости увеличение коэффициента массоотдачи может происходить незначительно и преимущественно за счет увеличения относительной скорости на границе раздела фаз (газ-жидкость) (см. главу 1). Также, увеличение интенсивности тепломассообменных процессов может происходить при неполном смачивании насадки, когда с увеличением расхода жидкости увеличивается лишь смоченная поверхность насадки. Для ГПН-насадки, как показано в главе 3, в условиях полного смачивания насадки, поверхность насадки покрыта «стоячими» волнами. Там же отмечено, что с увеличением расхода жидкости уменьшается амплитуда стоячих волн. Очевидно, что при уменьшении амплитуды стоячих волн также уменьшается площадь свободной поверхности плёнки жидкости, а, следовательно, и активная поверхность массообмена. Таким образом, при увеличении расхода жидкости на ГПН-насадке в диапазоне $700 < Re_{пл} < 4400$ увеличение коэффициента массоотдачи за счет роста межфазной скорости соседствует с явлением уменьшения активной поверхности тепломассообмена, из-за уменьшения амплитуды свободной поверхности плёнки жидкости.

При больших значениях критерия Рейнольдса газа ($Re_G > 2500$) наблюдается сложная картина зависимости критерия Шервуда на исследуемой насадке от расходов теплоносителей (см. рис. 4.1). Из рис. 4.2 видно, что при скоростях газа, соответствующих $Re_G > 2500$, наблюдается значительное влияние расхода жидкости на коэффициент массоотдачи.

Увеличение расхода жидкости приводит к росту коэффициента массоотдачи. Из рис. 4.1 также можно видеть, что с увеличением $Re_G > 2500$, увеличение расхода газа приводит к более интенсивному росту коэффициента массоотдачи, чем при скоростях газа, меньше 2,5 м/с ($Re_G < 2500$). В результате анализа результатов экспериментов, а также литературных источников, автор пришел к следующему выводу. При критерии Рейнольдса газового потока $Re_G > 2500$ увеличение интенсивности тепломассообмена за счет возникновения и развития турбулентности в газовом потоке соседствует с явлением уменьшения коэффициента массоотдачи за счет сноса жидкости с поверхности элементов насадки потоком газа. Фотография на рис. 4.3 демонстрирует характер происходящих в слое ГПН-насадки процессов сноса жидкости потоком газа в нижней части аппарата, при фиктивной скорости газа $w = 3$ м/с. На фотографии видно, как в нижней половине насадочной части аппарата с элементов насадки срывается плёнка жидкости. Следует отметить, что снос жидкости с насадки приводит к образованию сухих пятен на её поверхности, следствием чего является уменьшение активной поверхности массообмена. По этой причине при значении критерия Рейнольдса газа $Re_G > 2500$ (см. рис. 4.2), значительное влияние на коэффициент массоотдачи начинает оказывать величина расхода жидкости в аппарате. При увеличении расхода жидкости уменьшается площадь сухих пятен на насадке, образуемых за счет сноса плёнки жидкости потоком газа. Из-за неполного использования насадочного объема аппарата, а также из-за значительной нагрузки на каплеотбойник режим работы аппарата при скоростях газа более 2,5 м/с не является рациональным. Результаты этой серии экспериментов, также были обработаны по методике градирни. Эти результаты представлены на рис. П1 и рис. П2 в приложении 1. Представление результатов экспериментов в виде зависимости отношения коэффициента массоотдачи к расходу жидкости, позволяет оценить не только интенсивность процесса тепломассообмена на насадке, но также и глубину охлаждения. Из анализа разброса экспериментальных точек можно увидеть



Рис. 4.3. Снос жидкости с насадки при фиктивной скорости газа $w = 3$ м/с

охлаждения может быть достигнута при минимальном расходе жидкости и максимальном расходе газа. Отбросив ту часть экспериментальных данных, которая соответствует области турбулентного течения газа и сноса жидкости с насадки, можно видеть (см. рис. 4.4), что экспериментальные данные образуют семейство параллельных прямых. В то же время для других насадок градирен [54] эта зависимость, как правило, представляет собой одну прямую. По-видимому, это связано с тем, что для ГПН-насадки в условиях перекрёстного тока, относительный расход λ не является определяющим критерием подобия, а увеличение расхода жидкости не приводит к росту смоченной поверхности и интенсификации процесса теплообмена.

еще более сложный характер зависимостей, чем на рис. 4.1 и рис. 4.2. Каждая серия экспериментов при различных постоянных значениях расхода жидкости образует кривую, имеющую характерный излом, начинающийся с небольшого участка уменьшения коэффициента массоотдачи при увеличении расхода газа (за счет сноса жидкости с насадки). Из положения кривых на графике видно, что наибольшая глубина

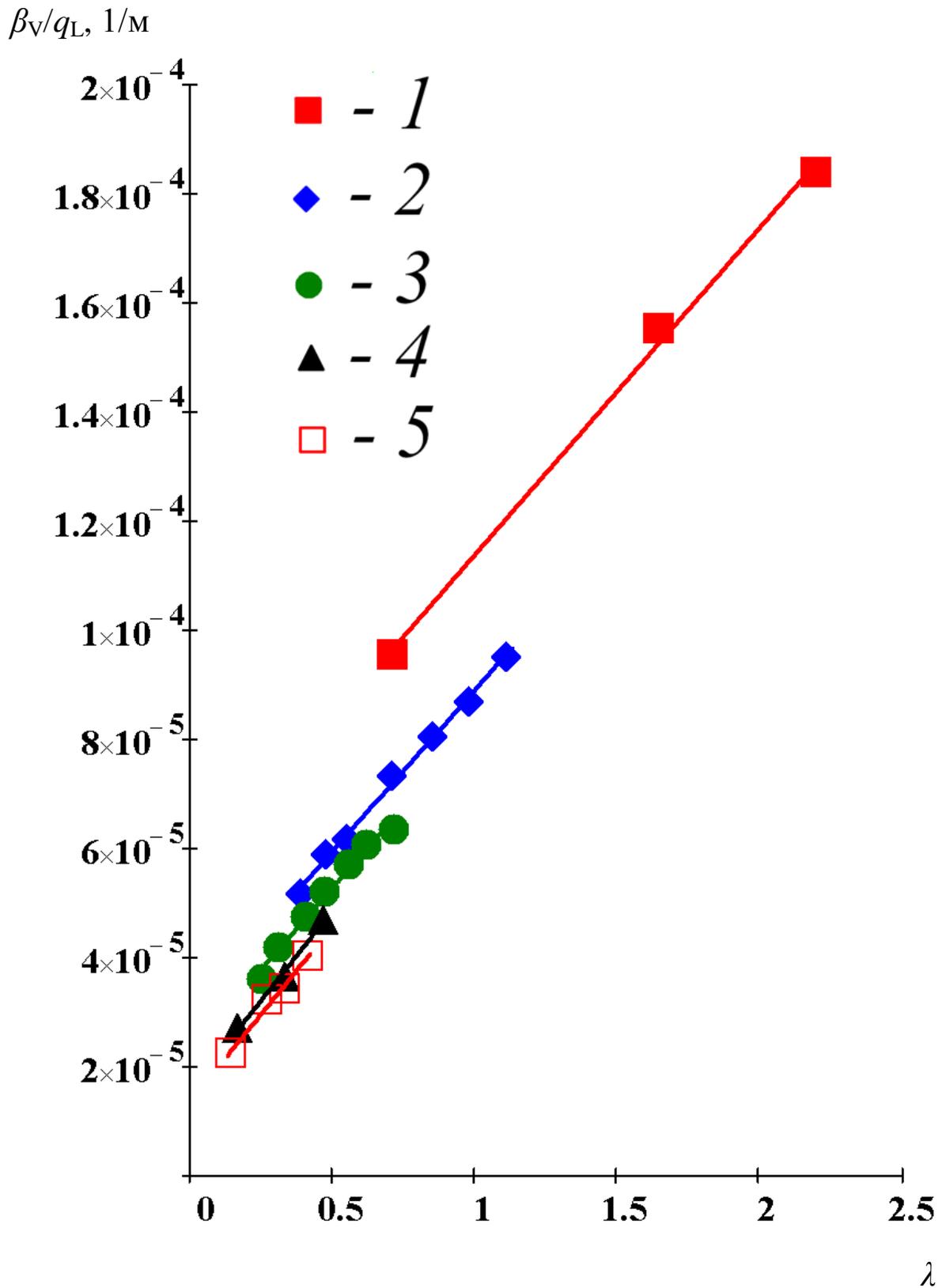


Рис. 4.4. Зависимость $\beta_V/q_L = f(\lambda)$
 1 - $Re_{пл} = 321$, $q = 19 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 2 - $Re_{пл} = 683$, $q = 40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;
 3 - $Re_{пл} = 1037$, $q = 60 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 4 - $Re_{пл} = 1566$, $q = 92 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;
 5 - $Re_{пл} = 1917$, $q = 112 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

В литературе отмечается [49, 60, 101], что на интенсивность процесса теплообмена при испарительном охлаждении могут оказывать влияние не только расходы теплоносителей. Поэтому автором были проведены несколько серий экспериментов по изучению влияния температур теплоносителей, длины блока насадки и величины зазора между элементами насадки на коэффициент массоотдачи.

Из-за сложности организации нагрева воздуха и поддержания постоянной его температуры, исследование влияния температуры теплоносителей на коэффициент массоотдачи удобнее проводить в условиях переменной температуры воды. При этом в литературе по-разному учитывается влияние температуры жидкости на коэффициент массоотдачи [49, 68, 101]. Например, в работе [49] авторами в качестве определяющего критерия подобия была выбрана относительная температура T_G / T_L . На основании этого было проведено три серии экспериментов при трех различных расходах газа. В экспериментах постепенно (в течении 80 мин.) возрастала начальная температура воды с 25 °С до 45 °С и регистрировались показания датчиков. Размеры и конфигурация блока насадки не изменялись ($l_{\text{нас}} = 100$ мм, $d = 14$ мм). Расход жидкости во всех сериях экспериментов был постоянный, и соответствовал линейной плотности орошения 0,49 м³/ (м·ч). Результаты этих экспериментов представлены на графике на рис. 4.5.

Из графика на рис. 4.5 можно видеть, что с увеличением начальной температуры воды (т.е. при уменьшении относительной температуры T_G / T_L) уменьшается величина коэффициента массоотдачи. В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов было установлено, что величина коэффициента массоотдачи на ГПН-насадке пропорциональна относительной температуре в степени 0,57. Это близко к результатам экспериментальных исследований Письменного [49], который для плоскопараллельного канала с сеточным покрытием получил значение показателя степени при относительной температуре, равное 0,55.

Анализ литературных источников [19, 24, 29, 31, 32, 49, 76, 78, 110] показал, что в процессах контактного теплообмена в целом, а также в процессах испарительного охлаждения, в частности, коэффициент массоотдачи пропорционален критерию Шмидта (диффузионное число Прандтля) в степени 0,33. В последующем это учитывалось при составлении критериального уравнения.

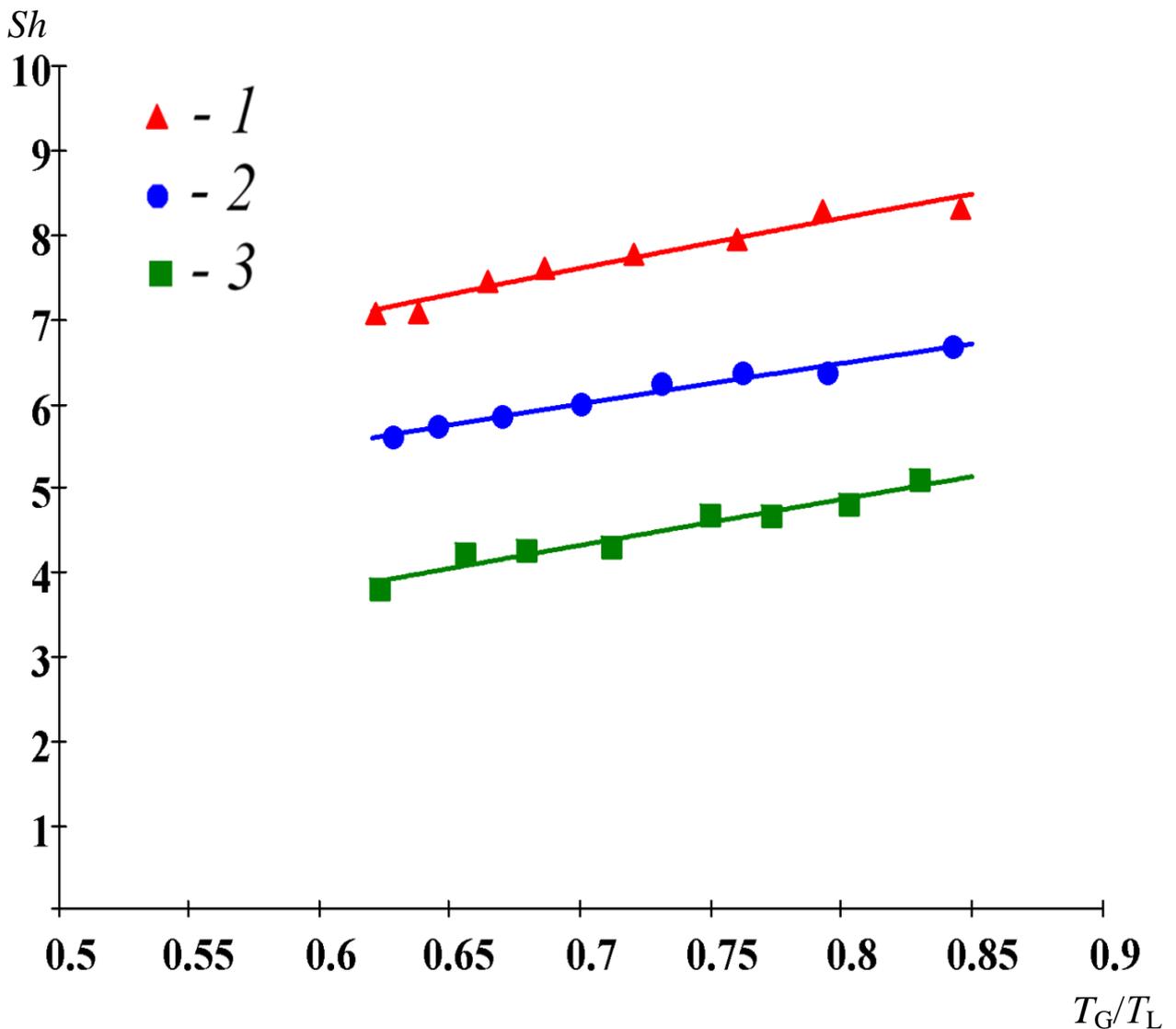


Рис. 4.5. Зависимость критерия Шервуда от относительной температуры
 1 — $Re_G = 1850$, $w = 1,69$ м/с; 2 — $Re_G = 1276$, $w = 1,17$ м/с; 3 — $Re_G = 724$, $w = 0,66$ м/с

Влияние размеров блока насадки на коэффициент массоотдачи исследовалось путем проведения нескольких серий экспериментов для блоков насадки с длиной 52, 100, 150, 200 мм и зазором между элементами

насадки 14 и 17 мм. Большие длины блока насадки не исследовались, ввиду приближения значений относительной влажности газа на выходе из аппарата к 100% (при малых скоростях газа). Каждая серия экспериментов проводилась при переменной скорости газа для нескольких расходов жидкости. Результаты каждой из этих серий экспериментов представлены в приложении 1 в виде зависимости критерия Шервуда от критерия Рейнольдса газа. Совместная обработка графиков представлена на рис. 4.6. Из графиков видно, что с увеличением длины элемента насадки уменьшается величина коэффициента массоотдачи. То же наблюдается и при уменьшении зазора между элементами насадки. В работе [49] исследовался процесс тепломассообмена при испарительном охлаждении воды в щелевом канале потоком газа. Там же предложено использовать в критериальном уравнении безразмерный симплекс геометрического подобия, представляющий собой отношение длины исследуемого канала, к его ширине. Для ГПН-насадки это можно представить как отношение длины блока насадки $l_{\text{нас}}$ к зазору между соседними элементами насадки Δ . Вводя в рассмотрение симплекс геометрического подобия, а также получив среднее значение показателя степени при критерии Рейнольдса газа (обработка экспериментальных данных проводилась методом наименьших квадратов), было получено критериальное уравнение для нахождения величины критерия Шервуда на ГПН-насадке вида:

$$Sh = 0,22 Re_G^{0,68} \left(\frac{T_G}{T_L} \right)^{0,57} \left(\frac{\Delta}{l_{\text{нас}}} \right)^{0,62} Sc^{0,33}. \quad (4.18)$$

Уравнение (4.18) позволяет при расчетах коэффициента массоотдачи учитывать не только режимные параметры работы контактного аппарата, но и геометрические размеры блока насадки, а также теплофизические свойства газа и жидкости. Опытные данные с максимальной погрешностью $\pm 20\%$ описываются уравнением (4.18).

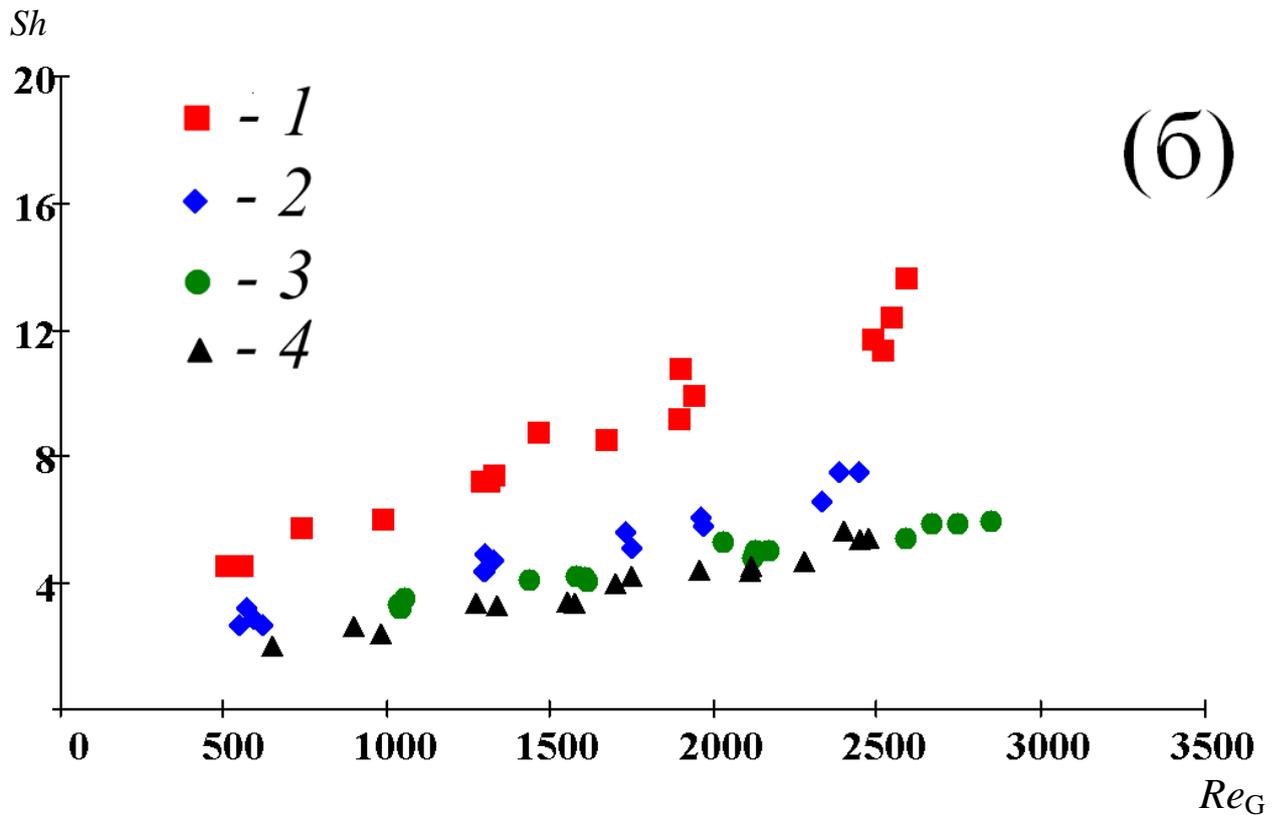
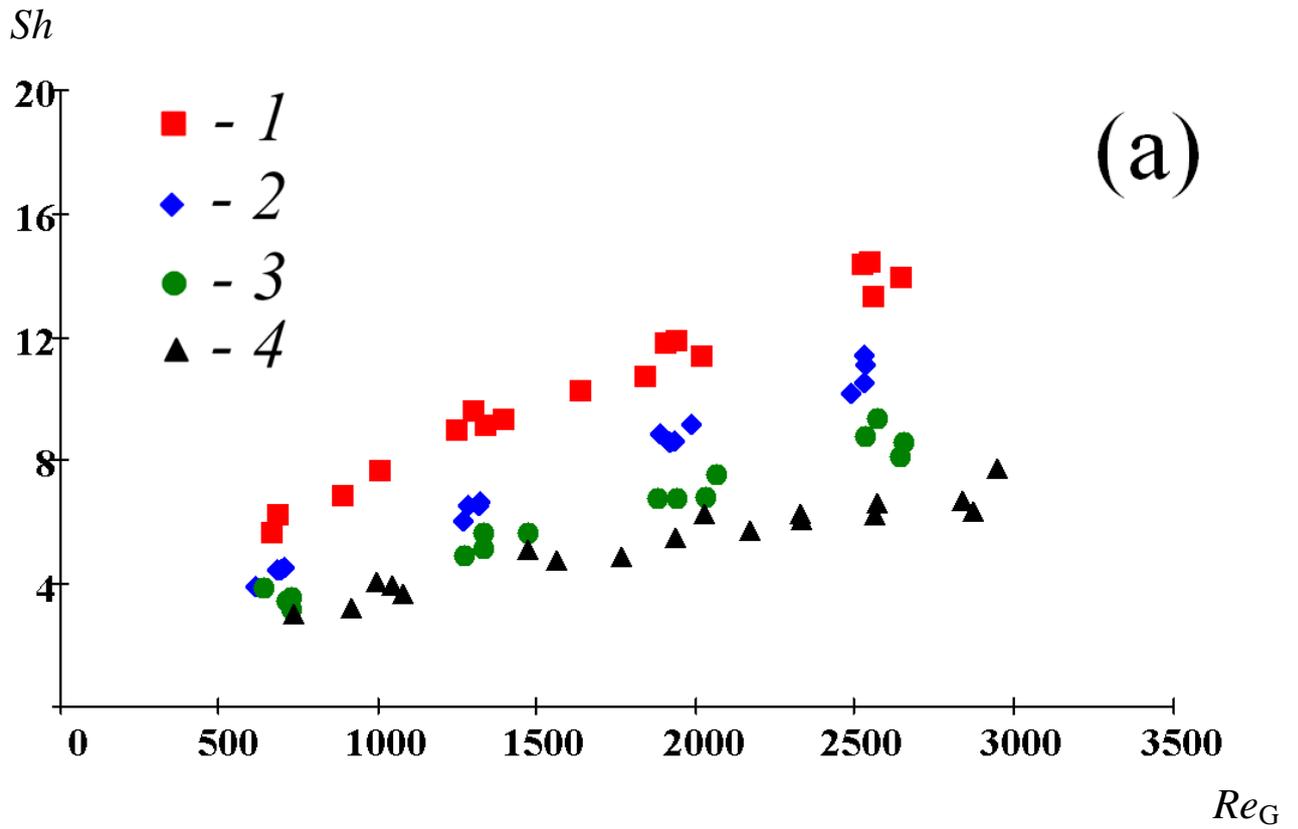


Рис. 4.6. Зависимость критерия Шервуда от критерия Рейнольдса газа при различной длине блока насадки $l_{\text{нас}}$ и зазоре между элементами насадки $\Delta = 14$ мм (а) $\Delta = 17$ мм (б).
 1 – $l_{\text{нас}} = 52$ мм; 2 – $l_{\text{нас}} = 100$ мм; 3 – $l_{\text{нас}} = 150$ мм; 4 – $l_{\text{нас}} = 200$ мм

4.3. Результаты сравнительных испытаний ГПН-насадки с другими конструкциями насадок

Представляется разумным провести сравнительную оценку ГПН-насадки с существующими конструкциями насадок. Для этой цели, следует сравнивать ГПН-насадку с насадкой, имеющей аналогичную структуру и конфигурацию блока, т.е. представляющую собой совокупность щелевых каналов. Плоскопараллельная насадка (далее ППН-насадка) [20, 57] обладает аналогичной конфигурацией блока и представляет собой, как правило, гладкие металлические листы, устанавливаемые в контактный аппарат вертикально с определенным зазором друг относительно друга. Поэтому была проведена серия экспериментов на ППН-насадке. ППН-насадка представляла собой набор параллельно устанавливаемых в аппарат пластин. Во избежание значительной разницы в величине краевого угла смачивания, элементы ППН-насадки выполнялись также из алюминиевого сплава. Габаритные размеры ППН-насадки были выбраны соответствующими ГПН-насадке. Зазор между пластинами составлял 14 мм. По сечению аппарата было установлено 11 пластин. Использовалось то же самое оросительное устройство, что и в сериях экспериментов с ГПН-насадкой. Было проведено три серии экспериментов при четырех различных расходах жидкости. При этом в экспериментах изменялась скорость газа. Непосредственно перед этими сериями экспериментов, были проведены испытания ГПН-насадки с блоком аналогичных размеров и конфигурации. Результаты экспериментов представлены на рис. 4.7 в виде зависимости объемного коэффициента массоотдачи от F-фактора. Из анализа графика на рис. 4.7 можно сделать вывод, что ГПН-насадка обладает более высокой эффективностью по сравнению с ППН-насадкой в исследованном диапазоне расходов газа и жидкости. Из рисунка также видно, что на коэффициент массоотдачи на ППН-насадке значительное влияние оказывает расход жидкости. С

увеличением расхода жидкости увеличивается коэффициент массоотдачи. Столь значительное влияние расхода жидкости на коэффициент массоотдачи может быть объяснено неполным смачиванием поверхности насадки водой. Автор убедился в этом после окончания опытов, путем визуального обследования линий тока жидкости на элементах ППН-насадки, участвовавших в экспериментах.

β_V , кг/(м³·с·кг/кг сух. газа)

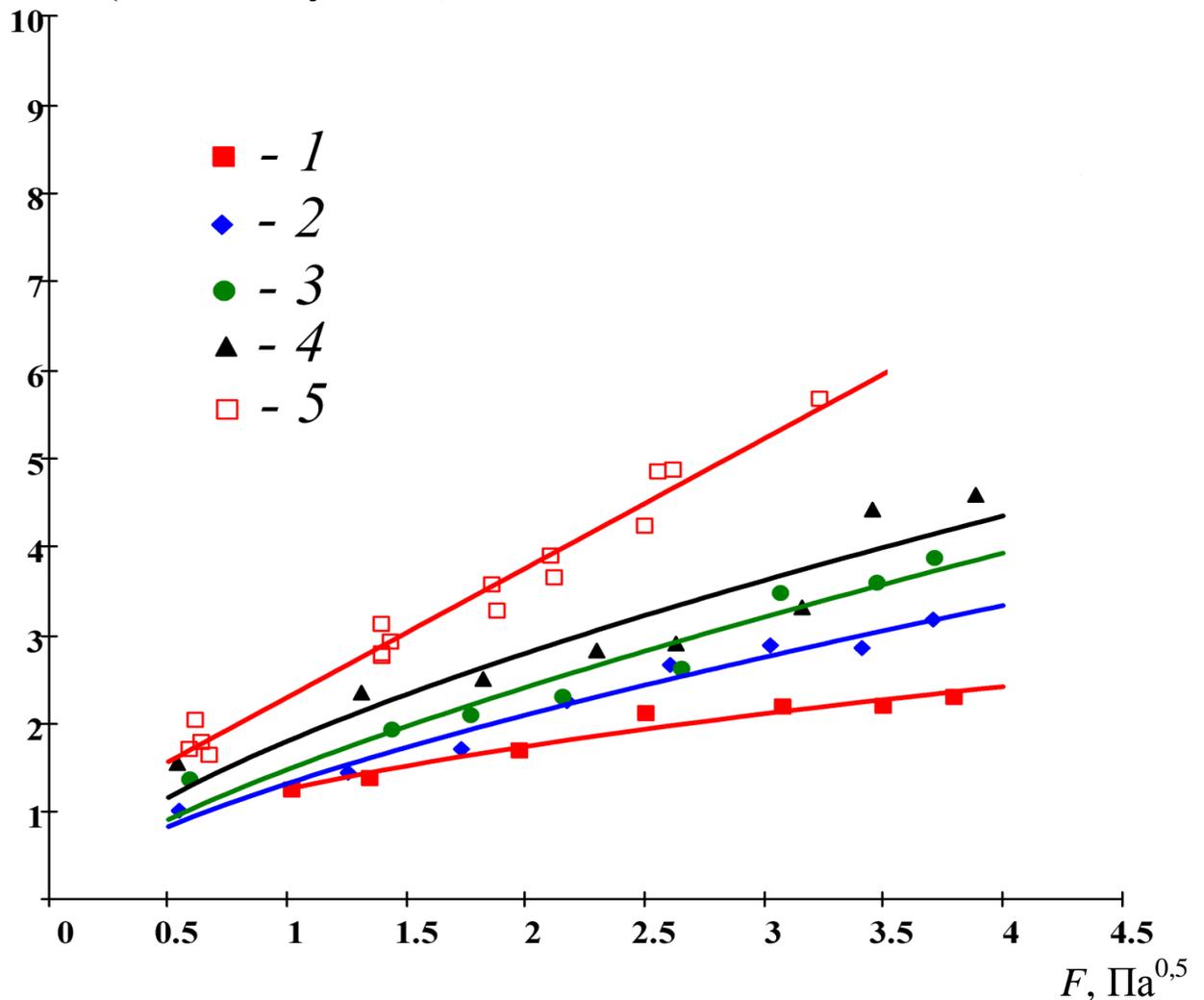


Рис. 4.7. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от F - фактора.
 1 – $Re_{пл} = 410$, $q = 28 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 2 – $Re_{пл} = 866$, $q = 59 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 3 – $Re_{пл} = 1374$, $q = 94 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 4 – $Re_{пл} = 1606$, $q = 110 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 5 – ГПН-насадка, $880 < Re_{пл} < 2400$

На рис. 4.8 представлена фотография элементов ППН-насадки, извлеченных из экспериментальной установки после проведения серий экспериментов. Из рис. 4.8 видно, по каким траекториям стекала жидкость по

элементам насадки. Можно наблюдать, что на ППН-насадке имеет место преимущественно ручейковое течение жидкости, в то время как на ГПН-насадке – плёночное (см. главу 3). В то же время, в верхней части аппарата

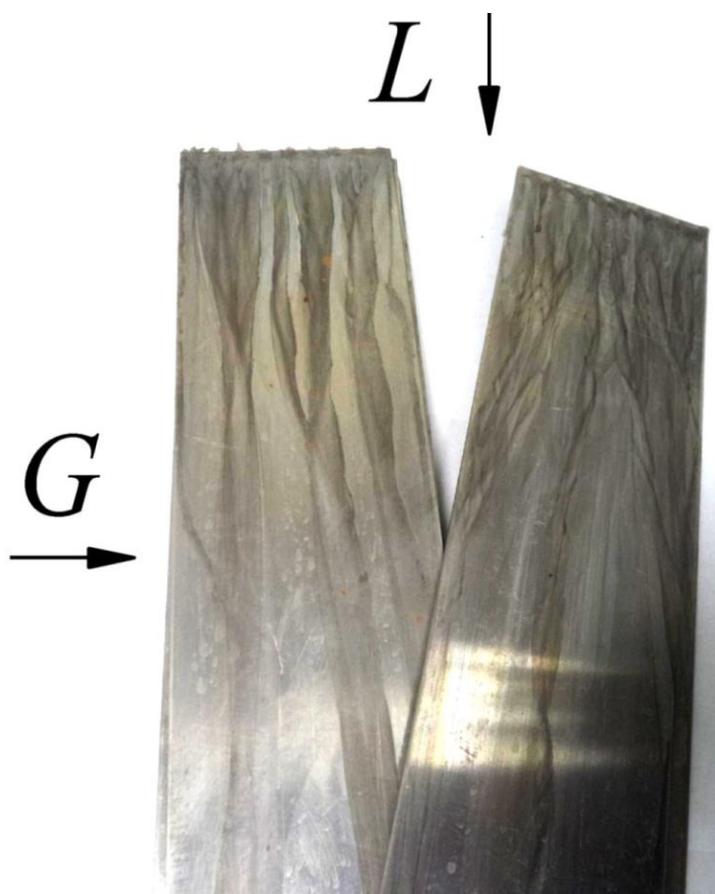


Рис. 4.8. Элементы ППН насадки после проведения аэротермических испытаний. G – направление движения газа в аппарате; L – направление стекания плёнки жидкости в аппарате.

насадка достаточно равномерно орошалась жидкостью из оросительного устройства (см. рис. 4.8). Кроме того, ГПН-насадка обладает более высокой удерживающей способностью по жидкости. Об этом можно судить по тому, что с увеличением скорости газа до значений, соответствующих F -фактору $3 \text{ Па}^{0,5}$ ($w \approx 3 \text{ м/с}$), наблюдается равномерный линейный рост коэффициента массоотдачи на ГПН-насадке (см. рис. 4.7). Обращаясь снова к фотографии на рис. 4.8 следует отметить, что траектории, по которым стекали ручейки жидкости по ППН-насадке, искривляются к нижней части аппарата и устремляются в сторону движения газового потока.

В результате обработки экспериментальных данных по испарительному охлаждению оборотной воды на ППН-насадке было получено критериальное уравнение:

$$Sh = 0,006 Re_G^{0,609} \cdot Re_{пл}^{0,432} \cdot Sc^{0,33}. \quad (4.19)$$

Критериальное уравнение (4.19) получено при рабочих расходах жидкости в диапазоне $410 < Re_{пл} < 1605$ и газа в диапазоне $1100 < Re_G < 7900$. Опытные данные описываются уравнением (4.19) с максимальной погрешностью $\pm 15\%$ (см. рис. 4.9).

Было проведено сравнение ГПН-насадки с другими конструкциями насадок. Это сравнение может быть проведено различными способами, среди которых сравнение по числу Меркеля, сравнение по числу единиц переноса, сравнение по критерию Шервуда или по коэффициенту массоотдачи. Сравнение результатов по числу Меркеля Me осложняется различиями в обработке экспериментальных данных различными исследователями. Ошибки некоторых исследователей при расчете числа Меркеля отмечаются в работе [27]. Например, в работе [33] можно видеть, что автором была неверно подсчитано значение числа Меркеля, единица измерения которого в результате авторских расчетов кг/м^3 (из-за использования объемной плотности орошения вместо массовой). Зачастую на это не обращают внимания авторы и некоторых других работ [60]. Кроме того использование числа Меркеля имеет практический смысл при сравнении насадок лишь в процессах испарительного охлаждения. Отношение коэффициента массоотдачи (в числителе Me) к плотности орошения (в знаменателе Me) является критерием оценки глубины охлаждения. В то же время в других процессах химической технологии, например, в процессе охлаждения дымовых газов (где основной целью является охлаждение газа, а степень нагрева воды является вторичной), следует выбрать другой критерий. Так, например число единиц переноса ($ЧЕП$) получило распространение в зарубежной литературе [91, 93] при расчетах градирен. Являющееся зачастую аналогом критерия Меркеля [93, 103] $ЧЕП$ может иметь в знаменателе вместо плотности орошения (как в критерии Me), удельный массовый расход газа (в $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$) [91]. В таком виде $ЧЕП$ более разумно применять в процессах, когда ключевой целью является изменение температуры газа (охлаждение дымовых газов контактным способом). Также

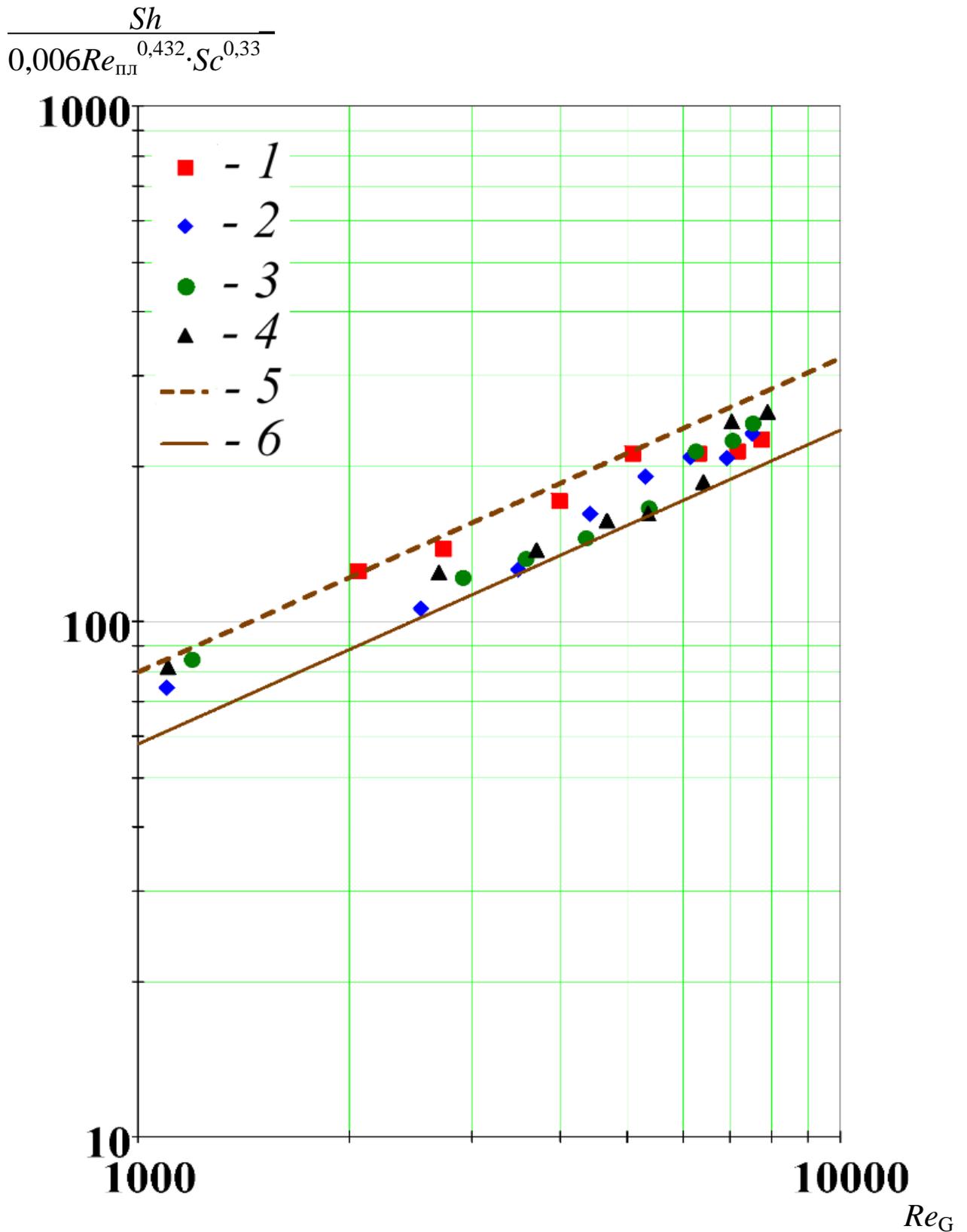


Рис. 4.9. Экспериментальные данные по массообмену на ППН-насадке $\Delta = 14$ мм, $l_{нас} = 100$ мм;
 1 – $Re_{пл} = 410$, $q = 28$ м³/(м²·ч); 2 – $Re_{пл} = 866$, $q = 59$ м³/(м²·ч);
 3 – $Re_{пл} = 1374$, $q = 94$ м³/(м²·ч); 4 – $Re_{пл} = 1606$, $q = 110$ м³/(м²·ч);
 5 – уравнение (4.19) с учетом погрешности + 15%;
 6 – уравнение (4.19) с учетом погрешности - 15%

ограниченно можно сравнивать насадки по критерию Шервуда Sh . Это связано с тем, что в последний входит поверхностный коэффициент массоотдачи. В качестве поверхности массообмена при расчете коэффициента массоотдачи часто принимают геометрическую поверхность насадочных тел. Таким образом, для насадок с большой удельной поверхностью критерий Sh зачастую оказывается меньше, чем для насадок с малой удельной поверхностью (крупные кольца Рашига, ППН-насадка, хордовая насадка и т.д.). Это связано с недостаточно полным смачиванием насадок с высокой удельной поверхностью. Введение в знаменатель критерия Шервуда коэффициента смачивания (отношение смоченной поверхности насадки к геометрической) [32] решает эту проблему, однако определение площади смоченной поверхности насадки является не простой задачей. Более рациональным представляется сравнение насадок по величине объемного коэффициента массоотдачи. Последний является, пожалуй, наиболее универсальной мерой оценки интенсивности массоотдачи между газом и жидкостью в насадочном аппарате, так как характеризует удельный съем теплоты (за счет массоотдачи) с единицы объема аппарата.

На рис. 4.10 представлена зависимость объемного коэффициента массоотдачи от фиктивной скорости газа для различных типов насадок, используемых в процессах испарительного охлаждения оборотной воды. Кривая (1) на рис. 4.10 получена для блока ГПН-насадки с параметрами $\Delta = 14 \cdot 10^{-3}$ м, $l_{\text{нас}} = 0,3$ м. Для остальных насадок рабочая высота слоя была принята равной 0,3 м. Из анализа графика, представленного на рис. 4.10, можно сделать вывод, что ГПН-насадка обеспечивает больший теплосъем с единицы объема насадки, по сравнению с некоторыми другими насадками. Кроме того, регулируя зазор между элементами насадки, а также изменяя компоновку блока насадки, можно обеспечить более высокие значения коэффициента массоотдачи.

Представляется целесообразным также сравнить гидравлическое сопротивление исследуемой насадки с сопротивлением некоторых других

β_V , кг/(м³·с·кг/кг сух. газа)

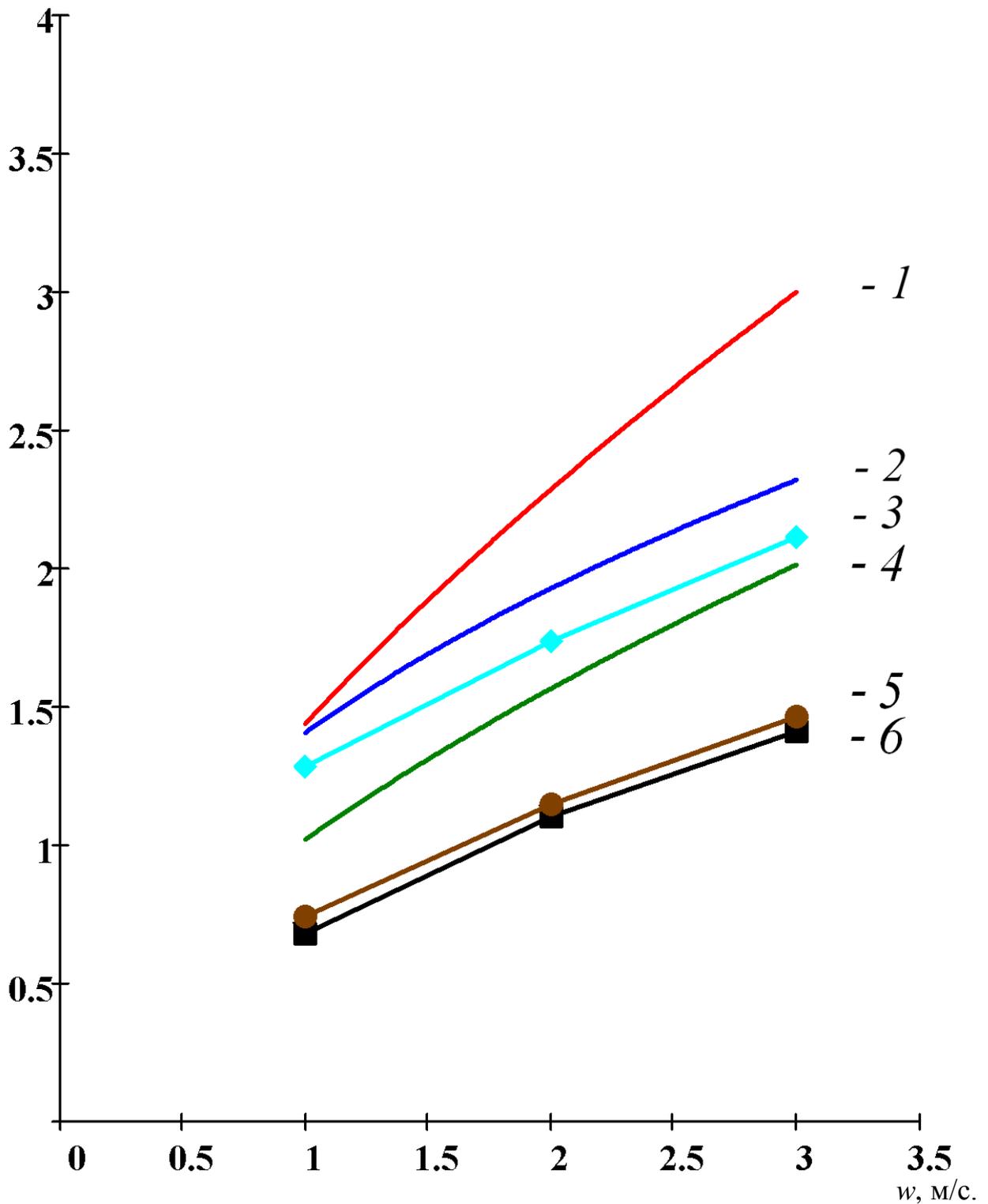


Рис. 4.10. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от скорости газа на различных насадках при испарительном охлаждении воды и плотности орошения $q = 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

1 – ГПН-насадка, уравнение (4.18); 2 – насадка ОГГТ-65 [7]; 3 – ККУ [83]; 4 – гофротрубы диаметром 44 мм [81]; 5 – насадка типа 36+6 [83]; 6 – насадка типа 22,5 [83]

насадок. Эксперименты (на экспериментальной установке № 2) показали, что гидравлическое сопротивление исследуемой насадки сопоставимо с гидравлическим сопротивлением пустого аппарата. Различие в гидравлическом сопротивлении пустого аппарата, и аппарата, заполненного насадкой, находится в пределах погрешности экспериментов. Таким образом, о гидравлическом сопротивлении можно судить по аналогии процессов тепло- и массообмена. Основная трудность в расчете гидравлического сопротивления насадочного контактного аппарата заключается в определении коэффициента гидравлического сопротивления орошаемой насадки $\xi_{ор}$. Для его нахождения можно воспользоваться аналогией Рейнольдса [56]. Аналогия Рейнольдса предполагает существование зависимости между коэффициентом массоотдачи и коэффициентом гидравлического сопротивления насадки в следующем виде:

$$\xi_{ор} = 8St \cdot Sc^{\frac{2}{3}}, \quad (4.20)$$

где диффузионное число Стантона St (критерий Маргулиса) определяется по формуле:

$$St = \frac{Sh}{Re_G \cdot Sc}. \quad (4.21)$$

Эта аналогия получена из предположения, что все гидравлическое сопротивление насадки представляет собой сопротивление трения, и лобовым сопротивлением можно пренебречь. Очевидно, что данная аналогия не может служить универсальным инструментом для определения гидравлического сопротивления насадок, так как для многих насадок значительный вклад в гидравлическое сопротивление вносит лобовое сопротивление. Особенно это касается насыпных насадок. Поскольку ГПН-насадка представляет собой набор параллельных каналов, то для данной насадки с достаточной для расчетов точностью можно пренебречь лобовым сопротивлением. Таким образом, для нахождения коэффициента гидравлического сопротивления аппарата с ГПН-насадкой можно

воспользоваться формулой (4.20) подставив в неё значение критерия Стантона, полученное по уравнению (4.21).

Также можно воспользоваться формулой, представленной в работе [36] для канала насадки со стекающей плёнкой жидкости:

$$Sh = 0,158 Re_G^{0,85} \left(\frac{\xi_{op}}{8} \right)^{0,429} Sc^{0,33}. \quad (4.22)$$

Формула (4.22), как правило, используется для нахождения коэффициента массоотдачи по известному коэффициенту гидравлического сопротивления орошаемой насадки. Очевидно, что формулу (4.22) можно использовать и в противоположных целях. Выражая из уравнения (4.22) коэффициент гидравлического сопротивления ξ_{op} и подставляя в эту формулу выражение для нахождения критерия Шервуда на ГПН-насадке (4.18), получим формулу для определения коэффициента гидравлического сопротивления орошаемой ГПН-насадки в виде:

$$\xi_{op} = 10,13 Re_G^{-0,1} \left(\frac{T_G}{T_L} \right)^{0,33} \left(\frac{\Delta}{l_{нас}} \right)^{0,35}. \quad (4.23)$$

Отсутствие в формуле (4.23) расхода жидкости, что нехарактерно для противоточных аппаратов, согласуется с литературными данными других авторов, исследующих плёночные перекрёстноточные контактные аппараты. Так, например, в работе [2] из анализа графиков $\Delta P = f(q)$ можно наблюдать лишь незначительное влияние расхода жидкости на коэффициент массоотдачи, проходящее через минимум. При этом, при изменении плотности орошения q с 5 до 20 ($\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$) (т.е. в 4 раза) при скоростях газа не более 2 м/с рост гидравлического сопротивления составляет всего 9%. Вывод о том, что коэффициент гидравлического сопротивления воздуха не зависит от плотности орошения, также представлен в работе [23], где авторы исследовали 6 насадок для поперечноточных градилен. Авторы работы [23] предлагают формулу для расчета коэффициента гидравлического сопротивления орошаемой насадки в виде:

$$\Delta P = A \cdot w^2. \quad (4.24)$$

где A – постоянная насадки, зависящая только от её геометрии.

Использование предлагаемого уравнения (4.23) позволяет оценить величину коэффициента гидравлического сопротивления орошаемой насадки и сравнить с коэффициентами гидравлического сопротивления других насадок. На рис. 4.11 представлены результаты в виде зависимости коэффициента гидравлического сопротивления орошаемой насадки от критерия Рейнольдса газа при плотности орошения $q = 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Из рассмотрения графика видно, что предлагаемая насадка при неизменных

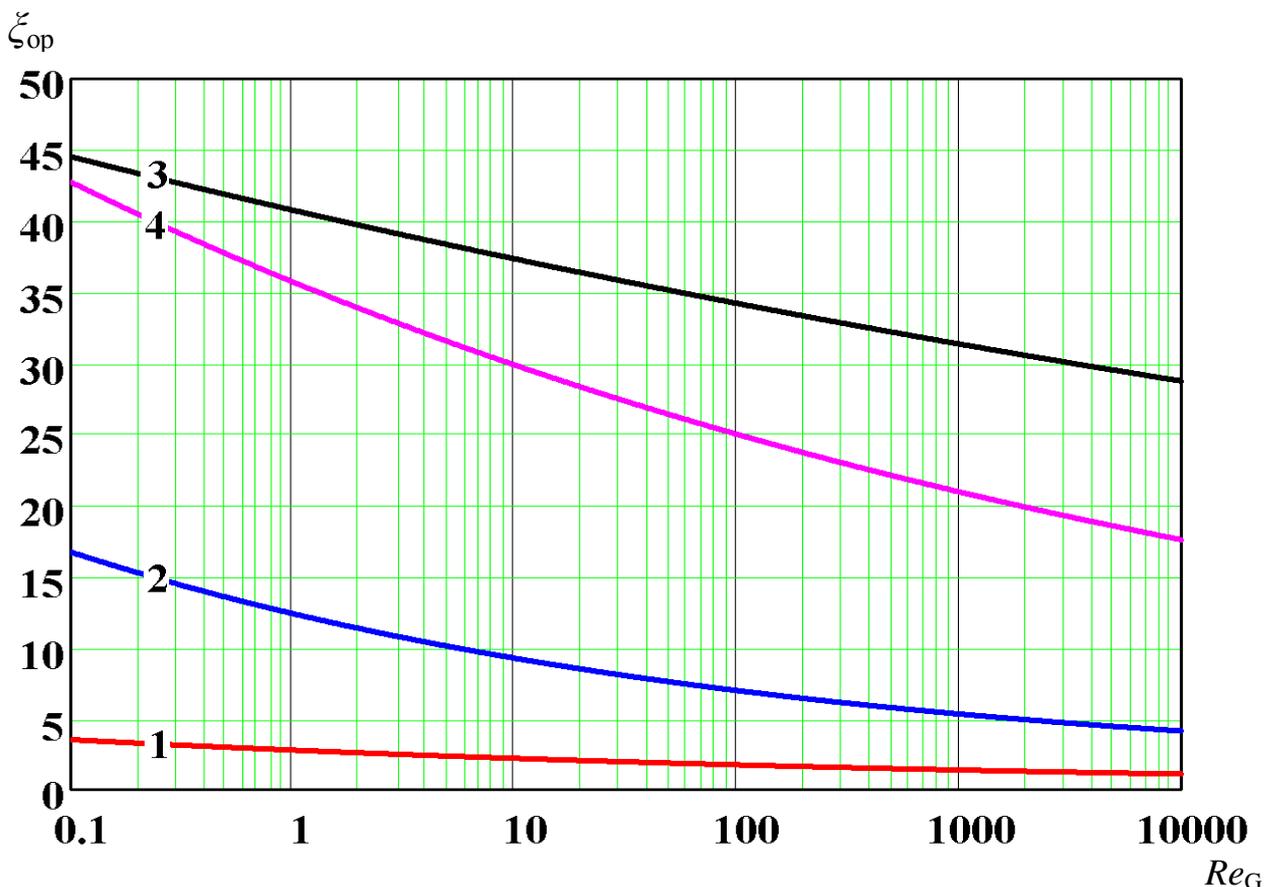


Рис. 4.11. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления орошаемых насадок от критерия Рейнольдса газа при плотности орошения $q = 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$ на различных насадках;
 1 – ГПН-насадка, уравнение (4.21); 2 – насадка типа 22,5 [83]; 3 – ККУ [83]; 4 – насадка типа 36+6 [83]

геометрических размерах блока ($\Delta = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $l_{\text{нас}} = 0,3 \text{ м}$) обладает меньшим гидравлическим сопротивлением. Это можно объяснить минимальным

лобовым сопротивлением насадки и отсутствием у ГПН-насадки участков резкой смены направления движения газового потока.

Основные результаты и выводы к главе 4

Получены новые экспериментальные данные по массообмену при перекрёстном взаимодействии потока атмосферного воздуха и воды на ГПН-насадке. Показано, что в отличие от большинства других насадок, и в частности от плоскопараллельной, коэффициент массоотдачи на ГПН-насадке не зависит от плотности орошения.

Установлено, что ГПН-насадка обладает хорошей удерживающей способностью по жидкости в условиях перекрёстного (поперечного) тока, что позволяет проводить процесс при скоростях газа, достигающих 2,5 м/с.

Установлено, что при фиктивной скорости воздуха в блоке ГПН-насадки более 2,5 м/с, в потоке воздуха развивается турбулентность, что приводит к резкому увеличению роста коэффициента массоотдачи с ростом скорости газа. В то же время, рост скорости газа более 2,5 м/с в исследованном диапазоне расходов жидкости приводит к сносу жидкости с насадки, что является следствием уменьшения коэффициента массоотдачи с ростом скорости газа.

Получено критериальное уравнение для определения величины коэффициента массоотдачи на ГПН-насадке.

Предложено уравнение для расчета коэффициента гидравлического сопротивления орошаемой насадки.

ГЛАВА 5. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНТАКТНОГО АППАРАТА С ГОФРИРОВАНО-ПРОСЕЧНОЙ НАСАДКОЙ

Расчет контактного аппарата с ГПН-насадкой (на примере градирни), предлагается проводить итерационным путем. Расчетная схема представлена на рис. 5.1. Движение газа в слое насадки рассматривается условно как противоточное. Теплофизические параметры газа и жидкости принимаются при средних арифметических значениях температур в аппарате. Известные формулы расчета теплофизических свойств газа и жидкости, таких параметров как энтальпия газа, критериев Прандтля и Шмидта и т.д. в настоящей главе не представлены, так как могут быть найдены в литературе [38], а также частично представлены в главе 4 настоящей работы.

5.1. Исходные данные

При расчете градирни исходными данными являются температура воды на входе T_L' , температура воды на выходе T_L'' , расход воды L , географическое место расположения градирни (высота над уровнем моря, климатические особенности и т.д.). Для нахождения параметров атмосферного воздуха, для градирни, работающей круглый год на открытом воздухе, рекомендуется воспользоваться расчетными параметрами атмосферного воздуха [54, табл. 5.1. с.101-102].

5.2. Выбор скорости газа и линейной плотности орошения

На начальном этапе следует задаться величиной зазора между элементами насадки Δ (см. схему насадки на рис. 2.1), фиктивной скоростью газа w , а также плёночным числом Рейнольдса $Re_{пл}$. Зазор между элементами насадки следует выбирать, исходя из фиктивной скорости газа, высоты блока

насадки, а также способа закреплёния насадки. При высоких скоростях газа и значительной высоте блока насадки возможны поперечные колебания элементов насадки (перпендикулярно вектору средней скорости газа в горизонтальной плоскости). При большой амплитуде колебаний возможны соударения элементов насадки, что приводит к образованию капель, уносимых газовым потоком.

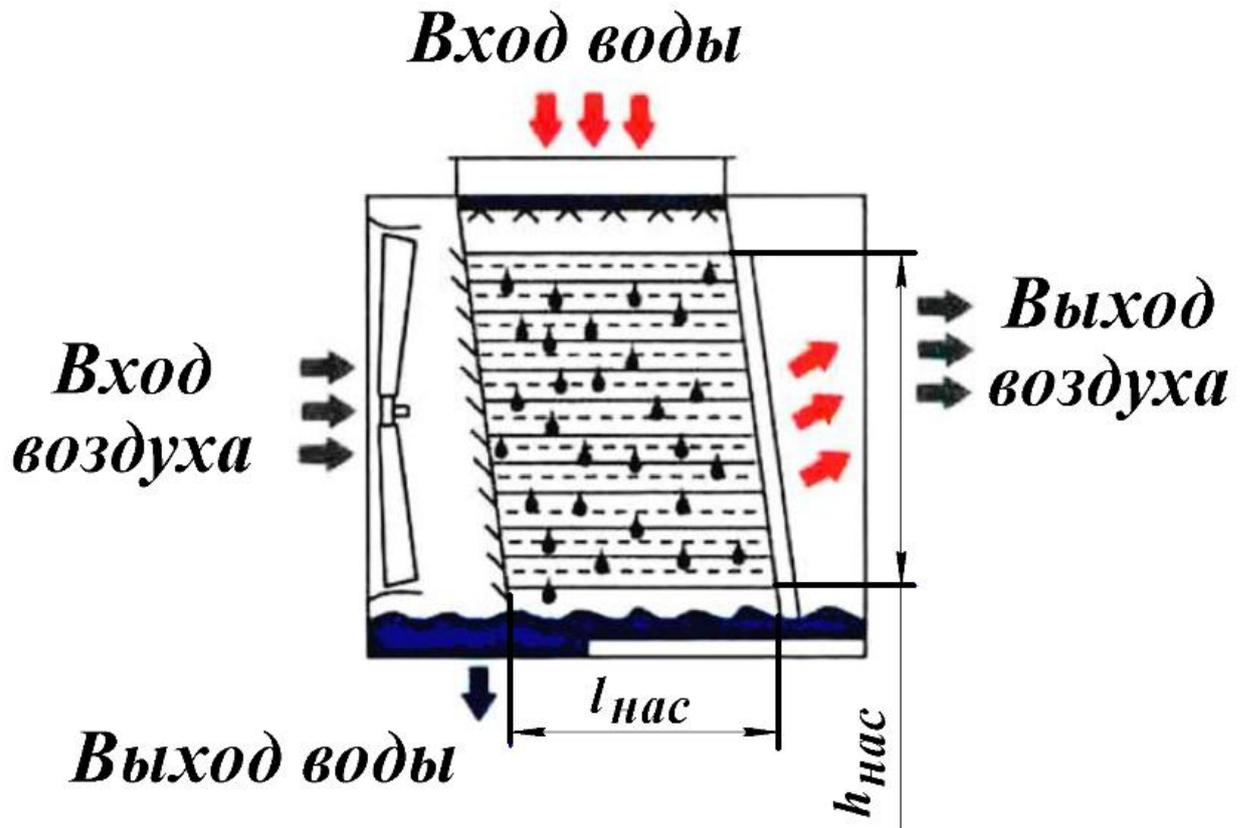


Рис. 5.1. Расчетная схема насадочного аппарата с перекрёстным током на примере градирни

Фиктивную скорость газа w не следует принимать больше чем 2,5 м/с, так как в этом случае будет иметь место значительный снос жидкости с поверхности элементов насадки (см. главу 4). Это приводит к образованию сухих пятен на насадке, неполному использованию рабочего объема насадки и повышенному уносу жидкости из аппарата.

Очевидно, что величина активной поверхности насадки в процессах теплообмена играет важную роль, что напрямую зависит от равномерности орошения. Для более глубокого охлаждения жидкости на

насадке, плотность орошения должна быть минимальной, но достаточной для полного смачивания насадки. Полное смачивание для ГПН-насадки с исследованным оросительным устройством (см. глава 2) в экспериментах достигалось при значениях плёночного числа Рейнольдса $Re_{пл} > 321$.

Для оросительных устройств иной конструкции (форсунки, перфорированные трубы, вращающиеся распределители жидкости и т.д.) обеспечение полного и равномерного смачивания обеих сторон элементов насадки может быть затруднено. Поэтому учет явления перетекания может оказать решающее воздействие при определении действительной поверхности массообмена в насадочном аппарате с регулярной насадкой. Исследование перетока жидкости с одной стороны элемента насадки на другую, позволило определить плотность орошения, при которой можно добиться гарантированного смачивания обеих сторон элементов насадки. Из кривой 1 на рис. 3.2. видно, что наиболее равномерное смачивание ГПН-насадки (когда $H \approx 0,5$) наблюдается при $1650 < Re_{пл} < 2200$. Таким образом, в случае, если в контактном аппарате невозможно обеспечить равномерное смачивание обеих сторон элементов насадки, следует выбирать значение плёночного числа Рейнольдса в диапазоне $1650 < Re_{пл} < 2200$.

5.3. Определение объема насадочной части аппарата

Для определения размеров насадочной части аппарата в горизонтальной проекции (см. расчетную схему на рис. 5.2) следует задаться одним из размеров насадочной части аппарата (шириной или длиной). Второй размер определяется исходя из необходимости обеспечения необходимой плотности орошения $\Gamma = Re_{пл} \cdot \nu / 4$. Из схемы на рис. 5.2 видно, что количество элементов насадки по ширине аппарата n на единицу больше количества зазоров между элементами насадки Δ . Расстояние от стенки аппарата до ближайшего элемента насадки приблизительно равно зазору между элементами насадки Δ . При определении длины блока насадки (т.е.

предварительно задаваясь шириной блока насадки) количество элементов насадки по ширине аппарата с достаточной точностью можно выразить уравнением:

$$n = \frac{b_{\text{нас}} - \Delta}{\Delta + c}, \quad (5.1)$$

где c – толщина элементов насадки в метрах, которая для исследуемой в опытах ГПН-насадки составляла $3 \cdot 10^{-3}$ м. Длина блока насадки (см. рис. 5.1), в этом случае, определяется по формуле:

$$l_{\text{нас}} = \frac{L}{A \cdot n \cdot \Gamma}. \quad (5.2)$$

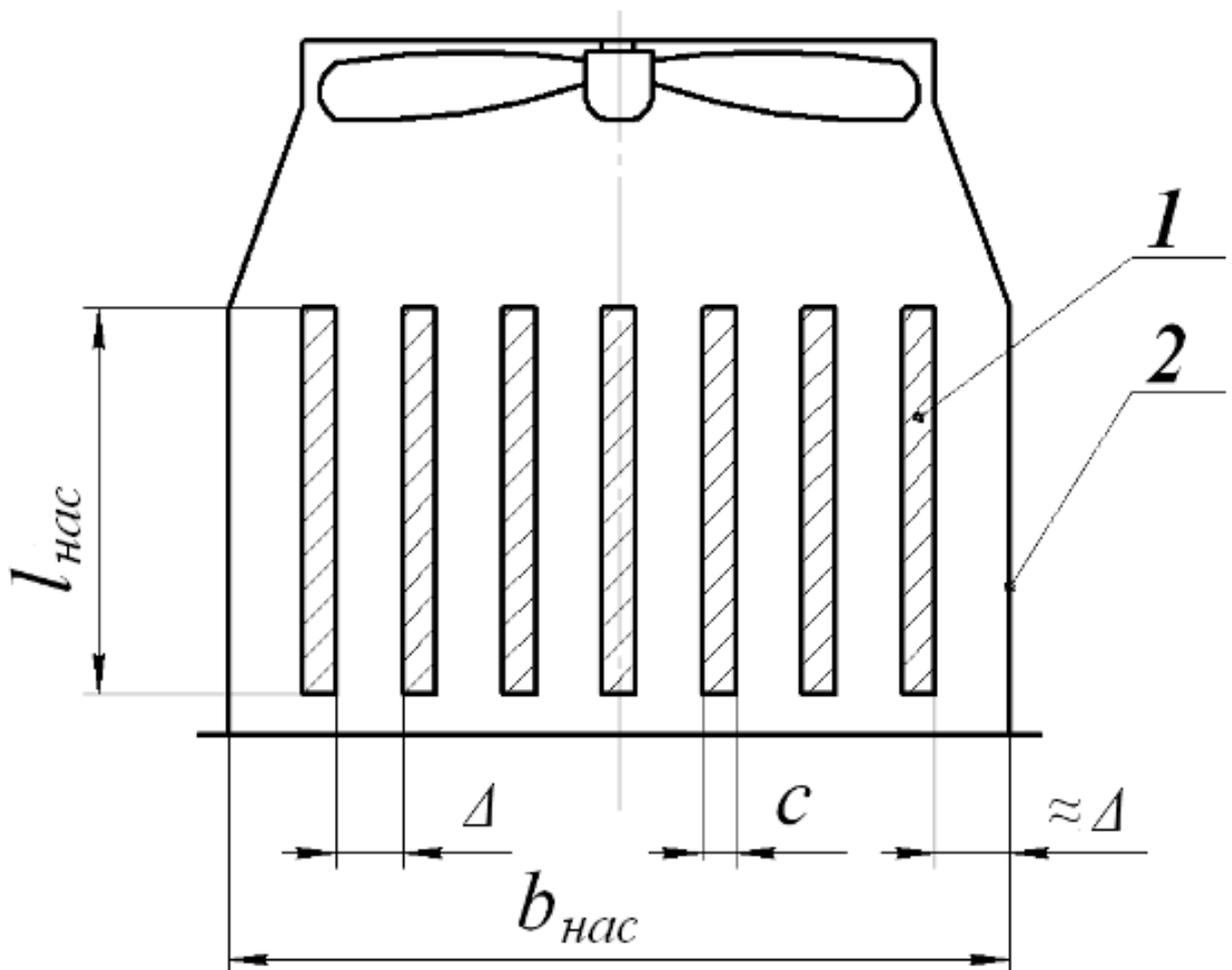


Рис. 5.2. Схема поперечноточной градирни с ГПН-насадкой в продольном сечении (вид сверху);
1 – элемент насадки; 2 – стенка аппарата

Если же предварительно задаваться шириной блока насадки, то количество элементов насадки по ширине аппарата будет определяться по формуле:

$$n = \frac{L}{A \cdot \Gamma \cdot l_{\text{нас}}}, \quad (5.3)$$

а ширина блока насадки:

$$b_{\text{нас}} = n(\Delta + c) + \Delta. \quad (5.4)$$

В формулах (5.2) и (5.3) множитель A соответствует количеству сторон элементов насадки, на которые поступает жидкость из оросительного устройства.

В первом приближении, температуру и влажность газа на выходе из аппарата рекомендуется принять на несколько градусов выше, чем на входе. На основании наблюдений было установлено, что повышение температуры газа на 1 °С, приблизительно соответствует повышению его относительной влажности на 10 %. В последующих приближениях принимаются температура и влажность газа, найденные через коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи, соответственно (см. формулы (5.23) и (5.17)).

Тепловой баланс градирни в процессе испарительного охлаждения может быть записан следующим образом [38]:

$$Q = C_L \left[\frac{L}{3600} (T_L' - T_L'') + L_{\text{исп}} \cdot T_L'' \right]. \quad (5.5)$$

Для нахождения количества теплоты, передаваемого от воды к воздуху, необходимо знать количество испарившейся в аппарате воды. Для этого в первом приближении можно принять, что количество испаряющейся воды в градирне равно 1% от общего расхода воды [54], т.е.:

$$L_{\text{исп}} = 0,01L. \quad (5.6)$$

В последующих приближениях, количество испаряющейся жидкости $L_{\text{исп}}$ можно найти с помощью коэффициента массоотдачи воспользовавшись для этого уравнением (5.18).

Поверхностный коэффициент массоотдачи входит в критерий Шервуда. Критерий Шервуда определяется по уравнению (4.15). Поверхностный коэффициент массоотдачи вычисляется по формуле:

$$\beta_f = \frac{D}{Sh \cdot d_e}. \quad (5.7)$$

В формулу (5.7) входит эквивалентный диаметр канала блока насадки, а для нахождения критерия Рейнольдса газа Re_G , входящего в уравнение (4.18) требуется знание величины удельной поверхности насадки. Эти данные можно найти в табл. 2.1. Если для выбранного зазора между элементами насадки Δ в табл. 2.1. не указана удельная поверхность и эквивалентный диаметр канала насадки, то для их расчета можно воспользоваться графиками (см. рис. 5.3 и рис. 5.4) или полученными автором в результате обработки данных по геометрическим характеристикам ГПН-насадки эмпирическими формулами:

$$a = \frac{1852}{\Delta^{0,767}}, \quad (5.8)$$

$$d_e = 0,992\Delta + 2,133. \quad (5.9)$$

Коэффициент теплоотдачи чаще всего рассчитывают, пользуясь аналогией Льюиса, согласно которой существует взаимосвязь, выражаемая уравнением:

$$\alpha_f = \rho_G \cdot C_G \cdot \beta_f \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{0,5}. \quad (5.10)$$

Для практических расчетов градиен, также можно рекомендовать уравнение:

$$\alpha_f = \beta_f \cdot C_G. \quad (5.11)$$

В градирне передача теплоты от жидкости к газу происходит как за счет конвективного теплообмена, так и за счет массообмена. Количество

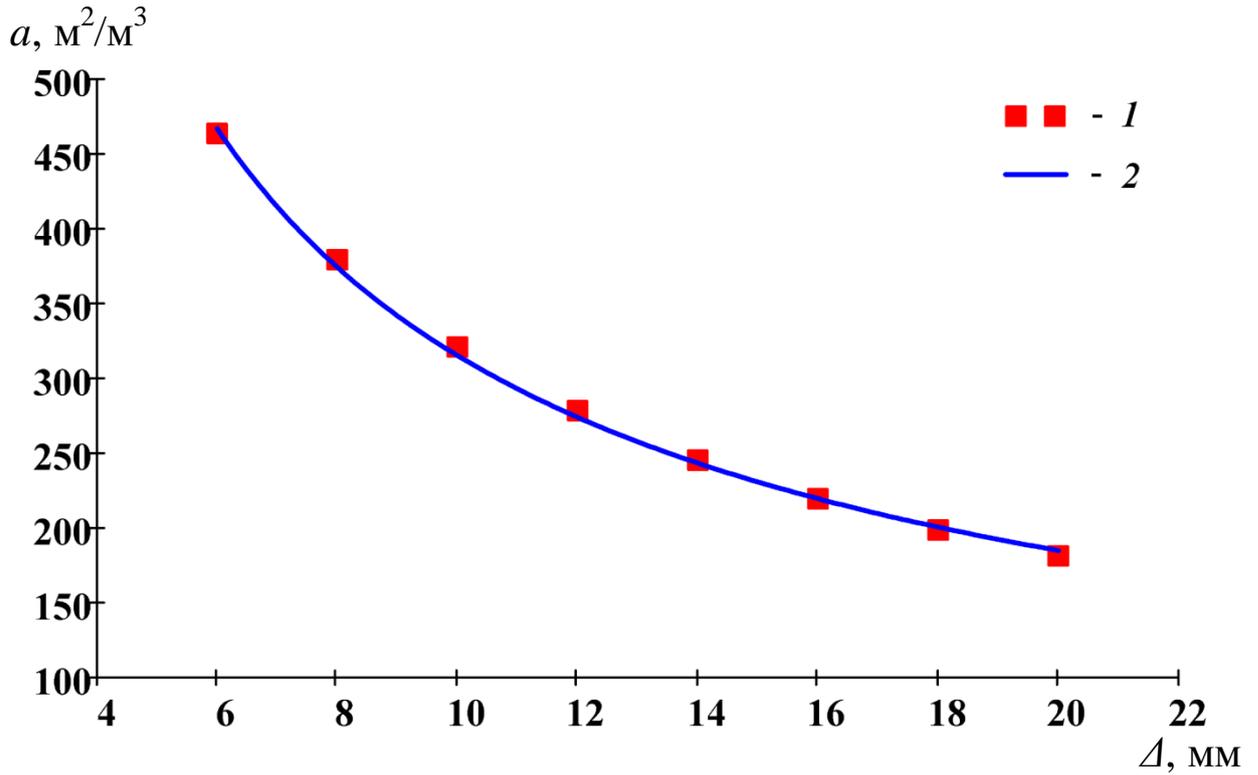


Рис. 5.3. Зависимость удельной поверхности ГПН-насадки от зазора между элементами насадки.

1 – Расчет через геометрическую поверхность; 2 – расчет по формуле 5.8

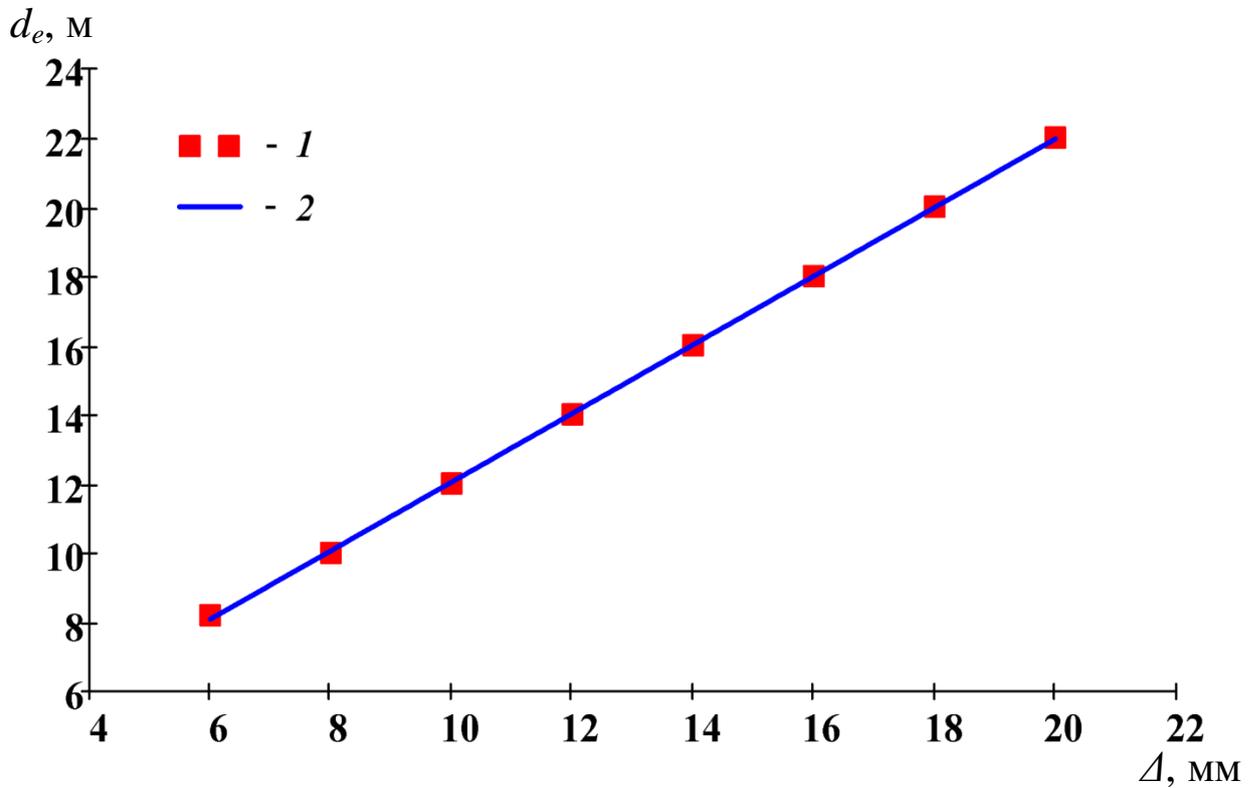


Рис. 5.4. Зависимость эквивалентного диаметра канала блока ГПН-насадки от зазора между элементами насадки.

1 – Расчет через геометрическую поверхность; 2 – расчет по формуле 5.9

теплоты, передаваемое с 1 м³ насадки в секунду за счет теплообмена, определяется по уравнению:

$$q_T = \alpha_f \cdot \Omega \cdot \Delta T. \quad (5.12)$$

Количество теплоты, передаваемое с 1 м³ насадки за счет массообмена определяется по уравнению:

$$q_M = \beta_f \cdot r \cdot \psi \cdot \Delta X. \quad (5.13)$$

В формулах (5.12) и (5.13) поправочные коэффициенты Ω и Z , учитывающие схему движения теплоносителей, принимаются согласно таблицам и графикам в работах [35, рис. 16.3] и [18, табл. 8] соответственно.

Требуемый объем насадки определяем по уравнению:

$$V = \frac{Q}{q_T + q_M}. \quad (5.14)$$

Отсюда высота блока насадки будет равна:

$$h_{\text{нас}} = \frac{V}{l_{\text{нас}} \cdot b_{\text{нас}}}. \quad (5.15)$$

Расход газа в градирне можно определить по уравнению:

$$G = w_0 \cdot h_{\text{нас}} \cdot b_{\text{нас}}. \quad (5.16)$$

Количество испарившейся в градирне воды определяется по уравнению:

$$L_{\text{исп}} \cdot \rho_L = G(X'' - X'). \quad (5.17)$$

Однако конечное влагосодержание газа X'' в этом уравнении неизвестно (в первом приближении им задаются). В то же время, конечное влагосодержание газа можно найти через коэффициент массоотдачи. Количество испарившейся в градирне воды можно найти из уравнения:

$$\Delta X = \frac{L_{\text{исп}} \cdot \rho_L}{a \cdot V \cdot \beta_f}. \quad (5.18)$$

В уравнение (5.18) конечное влагосодержание газа входит в виде движущей силы массообмена ΔX . Её принято определять как среднелогарифмическую по формуле:

$$\Delta X = \frac{(\Delta X_{\max}) - (\Delta X_{\min})}{\ln\left(\frac{\Delta X_{\max}}{\Delta X_{\min}}\right)}. \quad (5.19)$$

Если отношение большей разности влагосодержаний к меньшей < 2 , то с достаточной точностью можно вместо уравнения (5.19) среднюю движущую силу можно определять как среднеарифметическую:

$$\Delta X = \frac{\Delta X_{\max} + \Delta X_{\min}}{2}. \quad (5.20)$$

Таким образом, подставляя (5.20) или (5.19) в уравнение (5.18), решается система из двух уравнений (5.17) и (5.18) с двумя неизвестными.

5.4. Проверка сходимости теплового баланса

Из теплового баланса по воздуху, можно определить количество передаваемой теплоты в градирне, используя уравнение:

$$Q_{\text{дейст}} = G(i'' - i'), \quad (5.21)$$

и проверить сходимость теплового баланса, рассчитав относительную погрешность E :

$$E = \frac{Q - Q_{\text{дейст}}}{Q_{\text{дейст}}}. \quad (5.22)$$

Если $E < 5\%$, тогда следует оценить полученные значения высоты насадки для градирни $h_{\text{нас}}$. Если высота насадки по конструктивным соображениям устраивает расчетчика, то расчет окончен. Если же нет, тогда следует вернуться в начало и изменить некоторые параметры, например Δ , $l_{\text{нас}}$, w , $Re_{\text{пл}}$.

Если $E > 5\%$, тогда требуется еще одно приближение. Перед этим следует определить действительную температуру газа на выходе из аппарата по формуле:

$$T_G'' = \frac{q_T \cdot V + G \cdot \rho_G \cdot C_G \cdot T_G'}{G \cdot \rho_G \cdot C_G}, \quad (5.23)$$

и вернуться к определению теплового баланса градирни (5.5). В уравнение (5.5) следует подставить количество испарившейся жидкости, найденное по уравнению (5.17). В качестве температуры газа на выходе из аппарата следует принять температуру, найденную по уравнению (5.23). Влажосодержание газа на выходе из градирни было найдено по уравнению (5.18).

5.5. Определение объемной плотности орошения

Для того, чтобы перевести линейную плотность орошения в объемную (что требуется для подбора оросительного устройства, отличного от использованного в опытах), примем следующие допущения:

- 1) жидкость поступает равномерно на все элементы насадки;
- 2) жидкость непосредственно из оросительного устройства подается только на одну сторону элементов насадки.

Объемная плотность орошения определяется выражением:

$$q = \frac{L}{F} = \frac{L}{l_{\text{нас}} \cdot b_{\text{нас}}}, \quad (5.24)$$

где F – площадь сечения рабочей части аппарата в плане (в горизонтальном сечении) в м^2 .

Линейная плотность орошения определяется выражением:

$$\Gamma = \frac{L}{\Pi_{\text{нас}}}, \quad (5.25)$$

где $\Pi_{\text{нас}}$ – смоченный периметр насадки, м. Так как с учетом второго допущения жидкость подается лишь на одну сторону элементов насадки, тогда смоченный периметр будет равен сумме длин элементов насадки. Из уравнения (5.25) имеем:

$$\Gamma = \frac{L}{l_{\text{нас}} \cdot n}; \quad (5.26)$$

Объединяя уравнения (5.1) и (5.26) получаем уравнение для определения линейной плотности орошения в виде:

$$\Gamma = \frac{L}{l_{\text{нас}} \left(\frac{b_{\text{нас}} - \Delta}{\Delta + c} \right)} = \frac{L(\Delta + c)}{l_{\text{нас}} \cdot b_{\text{нас}} + l_{\text{нас}} \cdot \Delta} = \frac{L(\Delta + c)}{l_{\text{нас}} \cdot b_{\text{нас}} \left(1 - \frac{\Delta}{b_{\text{нас}}} \right)}. \quad (5.28)$$

Объединяя выражения (5.24) и (5.28) получим выражение для определения объемной плотности орошения:

$$q = \frac{\Gamma \left(1 + \frac{\Delta}{b_{\text{нас}}} \right)}{\Delta + c} = \frac{Re_{\text{пл}} \cdot v_L \left(1 + \frac{\Delta}{b_{\text{нас}}} \right)}{4(\Delta + c)}. \quad (5.29)$$

Подставляя в уравнение (5.29) значения $Re_{\text{пл}}$, соответствующие максимальному числу перетока (см. главу 3) получим плотность орошения, которую должно обеспечивать оросительное устройство в виде:

$$\frac{410v_L \left(1 + \left[\frac{\Delta}{b_{\text{нас}}} \right] \right)}{\Delta + 3 \cdot 10^{-3}} \leq q \leq \frac{550v_L \left(1 + \left[\frac{\Delta}{b_{\text{нас}}} \right] \right)}{\Delta + 3 \cdot 10^{-3}}. \quad (5.30)$$

5.6. Определение мощности вентилятора градирни

Для нахождения мощности вентилятора градирни требуется определить гидравлическое сопротивление слоя насадки, расчет которого осуществляют по формуле:

$$\Delta P_{\text{ор}} = \xi_{\text{ор}} \cdot \frac{l_{\text{нас}}}{d_e} \cdot \frac{\rho_{\Gamma} \cdot w_G^2}{2}. \quad (5.31)$$

Для нахождения $\xi_{\text{ор}}$ можно воспользоваться аналогией Рейнольдса [62]. Для этого определение коэффициента гидравлического сопротивления можно производить по формуле (4.20). Можно также воспользоваться более уточненной и подтвержденной экспериментами (для плёночных блоков

оросителей градирен) аналогией между процессами теплообмена. Для этого можно воспользоваться уравнением (4.23).

Основные результаты и выводы к главе 5

Предложена методика расчета контактного теплообменного аппарата на примере поперечноточной градирни, позволяющая определить требуемый расход газа и размеры блока насадки.

Предложены эмпирические зависимости для определения основных геометрических характеристик ГПН-насадки в зависимости от зазора между соседними элементами насадки.

Предложенная методика расчета контактного аппарата была использована ООО «Каскад» в проекте автоматизированного стенда для исследования испарительного охлаждения воды (см. прил. 2).

Предложенная методика расчета контактного аппарата была использована при разработке методики расчета насадочных аппаратов для контактного теплообмена, которая используется в учебном процессе в СПбГУПТД при преподавании дисциплины «Техносферная безопасность» (см. прил. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 жидкостью, 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. Установлено, что ГПН насадка обладает более высокой эффективностью, по сравнению с плоскопараллельной насадкой и позволяет проводить процессы контактного теплообмена при более высоких скоростях газа.
5. Разработана конструкция насадочного тепломассообменного аппарата с ГПН-насадкой.
5. Разработана методика расчета контактного теплообменного аппарата с ГПН-насадкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллин А.З. Разработка конструкций и метод расчета струйных насадок для массообменных процессов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Абдуллин Ахияр Зарифович. – Уфа., 2003. – 20 с.
2. Алексеев В.П., Дорошенко А.В. О частных коэффициентах тепло- и массоотдачи в градинях с регулярными насадками // Холодильная техника. 1971. - № 3. – С. 46-49.
3. Алексеенко С.В. Волновое течение плёнок жидкости: Монография / Алексеенко С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. – Новосибирск : «Наука». Сибирская издательская фирма, 1992. – 256 с.
4. Алексеенко С.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М. Характеристики уединенных трехмерных волн на вертикально стекающих плёнках жидкости // Письма в ЖТФ. – 2010. – № 22 (36). – С. 1 – 8.
5. Алексеенко С.В., Маркович Д.М., Евсеев А.Р., Бобылев А.В., Тарасов Б.В., Карстен В.М. Экспериментальное исследование распределения жидкости в колонне со структурными насадками // Теоретические основы химической технологии. – 2007. – № 4 (41). – С. 442-448.
6. Безродный М.К., Письменный Е.Н., Туз В.Е., Лебедь Н.Л. Экспериментальное исследование гидродинамики плёночного течения в каналах с сеточным покрытием // Промышленная теплотехника. – 2009. - №7 (31). – С. 139-143.
7. Боев Е.В. Совершенствование конструкций тепломассообменных насадок из полимерных материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Боев Евгений Владимирович. – Уфа, 2008. – 23 с.
8. Бутусов О.Б., Жилейкин Я.М., Кукаркин А.Б., Никифорова О.П. Математическое моделирование гравитационного течения плёнки

- жидкости по вертикальной поверхности с ребрами // Вычислительные методы и программирование. – 2013. – Т.14. – С. 419-423.
9. Ваганов А.А. Совершенствование регулярной сетчатой насадки для процесса охлаждения воды в градирнях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Ваганов Александр Анатольевич. – М., 2011. – 16 с.
 10. Васильев А.В., Бальчугов А.В. Разработка новой регулярной насадки с эффектом эжектирования для тепло- и массообменных процессов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 3 (31). – С. 135-139.
 11. Войнов Н.А., Николаев А.Н., Войнова О.Н. Гидродинамика, тепло- и массоперенос в плёночных биореакторах // Химия растительного сырья. 2009. – № 4. – С. 183-193.
 12. Володин О.А. Теплообмен и кризисные явления при плёночном течении бинарной смеси хладонов на гладких и структурированных поверхностях: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Володин Олег Александрович. – Новосибирск, 2014. – 144 с.
 13. Ворошин А.В. Разделение бикомпонентной смеси в ректификационной установке непрерывного действия с пакетной вихревой насадкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Ворошин Андрей Валерьевич. – Иваново, 2013. – 16 с.
 14. Ворошин А.В., Чагин О.В., Блиничев В.П. Анализ конструктивного оформления ректификационных колонн // Химическая промышленность сегодня. – 2013. – № 9. – С. 23-28.
 15. Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении плёнки жидкости : Монография / Под ред. А. Жукаускаса. – Вильнюс : Мокслас, 1988. – 233 с.
 16. Горизонтальный насадочный тепломассообменный 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.

17. Городилов А. А., Пушнов А. С., Беренгартен М. Г. Совершенствование конструкции хордовой насадки // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – №2. – С. 10-13.
18. ГОСТ Р ЕН 14705-2011. Теплообменники. Методы измерения и оценки тепловых характеристик испарительных градирен. Технические требования [Текст]. – Введ. впервые 2013 – 01 – 01. – М. : Стандартиформ, 2013. – 49 с.
19. Дикий Н.А., Туз В.Е., Трокоз Я.Е., Кузьменко И.Н. Тепломассоперенос при испарении жидкости в каналах с пористыми стенками // Труды IV Минского международного форума по тепломассообмену. – Минск: АНК “Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова” НАНБ. – 2000. – С. 336-340.
20. Дикий Н.А., Шовкалюк Ю.В. Исследование гидродинамики элемента плоскопараллельной насадки с экранированной водяной плёнкой // Промышленная теплотехника. – 2004. – № 6 (26). – С. 31-35.
21. Дмитриева, Г.Б, Беренгартен М.Г., Каган А.М., Пушнов А.С., Климов А.Г. Сравнение тарельчатых и насадочных контактных устройств колонных аппаратов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – №1. – С. 9-10.
22. Дмитриева Г.Б. Гидродинамика и массообмен в структурированных насадках из гофрированных листов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Дмитриева Галина Борисовна. – Иваново, 2007. – 19 с.
23. Дорошенко А.В., Липа А.И., Сикорская Е.М. Рабочие характеристики поперечноточных вентиляторных градирен // Холодильная техника. – 1982. – №9. – С. 23-29.
24. Егоров Н.Н. Охлаждение газа в скрубберах. М. : Госхимиздат, 1954. – 142 с.
25. Жандос С. Разработка и расчет тепломассообменных аппаратов с подвижной насадкой с учетом масштабного перехода : дис...докт. философии : 6D072400 / Жандос Серикулы. – Шымкент, 2013. – 140 с.

26. Каган А.М., Чиж К.В., Пушнов А.С., Тимонин А.С., Юдина Л.А., Пальмов А.А. Аэродинамика миникольцевых насадок // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – №6 (68). – С. 42-45.
27. Калатузов В.А. Сравнение расчетной зависимости оросителей градирен // Труды Академэнерго. – 2011. – № 3. – С. 31-41.
28. Капица П.Л. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости // ЖЭТФ. – 1948. – № 1 (18). – С. 3-28.
29. Ковалев О.П., Ильин А.К. Математическая модель управления процессом контактного теплообмена и экспериментальная проверка ее адекватности // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2012. – № 2. – С. 81-84.
30. Коморович Т., Матера Я., Баранов Д.А., Беренгартен М.Г. Высокоэффективные структурно-кольцевые насадки // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2001. – № 8. – С. 8-12.
31. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов : Монография / [Каган А.М. и др.] ; Под ред. А.Г. Лаптева. – Казань: Отечество, 2013. – 454 с. : ил.
32. Контактные теплообменники : Монография / [Е.И. Таубман и др.] ; Под ред. Р.Е. Миневича. - М. : Химия, 1987. – 256 с. : ил.
33. Кравченко В.П., Морозов Е.Н., Галацан М.П. Сопоставление охлаждающей способности асбесто-цементного и сетчатого оросителя башенных градирен // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 2/8 (50). – С. 13-16.
34. Кремнев В.О. Применение вентиляторного теплообменного аппарата для утилизации теплоты отработанного теплоносителя сушильных установок // Промышленная теплотехника. – 2009. – № 7 (31). – С. 109.
35. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

36. Лаптева Е.А., Лаптев А.Г. Ячеечная модель тепломассопереноса в плёночных блоках оросителей градирен // Вестник казанского технологического университета. – 2015. – № 11 (18). – С. 181-185.
37. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов : Монография. Казань : Изд-во Казанского университета, 2007. – 500 с.
38. Лаптев А.Г. Устройство и расчет промышленных градирен : Монография / А.Г. Лаптев, И.А. Ведьгаева. – Казань. : КГЭУ, 2004. – 180 с. : ил.
39. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Башаров М.М. Основы энергосберегающей модернизации аппаратов разделения веществ // Вестник ИГЭУ. – 2011. – № 1. – С. 1-4.
40. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Лаптева Е.А., Минигулов Р.М. Гидравлические характеристики рулонной гофрированной тепломассообменной насадки // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – № 1 (63). – С. 35-37.
41. Марценюк А.С. Интенсификация массообмена в аппаратах с регулярными насадками. Капельно-плёночное течение жидкости : Монография. Lambert Academic Publishing. 2012. – 244 с.
42. Марценюк А.С. Интенсификация массообмена в плёночных аппаратах организацией капельно-плёночного течения // Научные труды Одесской национальной академии пищевых технологий. – 2013. – № 2 (43). – С. 29-34.
43. Масагутов Д.Ф., Пушнов А.С., Тарасова Л.А., Шишов В.И. Влияние высоты слоя регулярной насадки на эффективность процесса испарительного охлаждения // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – № 2 (82). – С. 24-27.
44. Меренцов Н.А., Балашов В.А., Голованчиков А.Б., Орлякина Я.А. Экспериментальная установка для исследования тепломассообменных процессов в насадочных устройствах градирен // Известия ВолгГТУ:

- Межвуз. сб. науч. ст. (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии». Вып. 5). – 2012. – №1 (88). – С. 78-80.
45. Насадки массообменных колонн : науч. изд. / [Б.А. Сокол и др.] ; Под ред. Д.А. Баранова. – М. : Инфохим, 2009. – 358 с.
46. Неробелов А.О., Полянский А.В., Ворошин А.В. Разработка ректификационной колонны непрерывного действия с пакетной вихревой насадкой для получения этилового спирта // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология: материалы третьей Всероссийской научной конференции. – Казань: Издательство КНИТУ, 2012. – С. 42-44.
47. Николаев А.Н. Гидродинамика и тепломассоперенос в плёночных реакторах микробиологического синтеза : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08, 03.00.23 / Николаев Александр Николаевич. – Казань, 2007. –16 с.
48. Павленко А.Н. Тепломассоперенос и разделение смесей при дистилляции в сложных канальных системах / Сборник докладов Всероссийской конференции XXXI «Сибирский теплофизический семинар». – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2014. – С. 16-28.
49. Письменный Е.Н., Дикий Н.А., Туз В.Е., Лебедь Н.Л. Тепломассообмен в насадке перекрёстноточного контактного аппарата / Труды четвертой российской национальной конференции по теплообмену в 8 томах; том 5 Испарение, конденсация, двухфазные течения. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – С. 157-160.
50. Платонов Н.И., Семенов В.П. Тепло- и массообмен между газом и свободной плёнкой жидкости в утилизаторе теплоты уходящих газов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 6 (62). – С. 38-40.
51. Плёночная тепло - и массообменная аппаратура (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) : Монография / [В.М. Олевский и др.] ; Под ред. В.М. Олевского. М. : Химия, 1988. – 240 с. : ил.

52. Плёночные биореакторы : Монография / [Войнов Н.А. и др.] . – Красноярск : Издательство «БОРГЕС», 2001. – 252 с.
53. Повтарев И.А. Гидродинамика и массообмен в колонном аппарате с пакетной вихревой насадкой (на примере абсорбции углекислого газа раствором диэтанолamina) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Повтарев Иван Александрович. – Иваново, 2013. – 16 с.
54. Пономаренко В.С. Градирни промышленных и энергетических предприятий: Справочное пособие / В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьев. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 376 с. : ил.
55. Проектирование, монтаж и эксплуатация тепломассообменных установок : Учеб. пособие для вузов / [Бакластов А.М. и др.] ; Под ред. А.М. Бакластова. – М.: Энергоиздат, 1981. – 336 с. : ил.
56. Протасов С.К., Боровик А.А., Матвейко Н.П. Исследование новой регулярной насадки // Химическая промышленность. – 2013. – № 2 (90). – С. 97-101.
57. Процессы и аппараты защиты окружающей среды; насадочные скрубберы для контактного теплообмена : учебное пособие / [М.Г. Беренгартен и др.]. – СПб : ФГБОУВПО «СПГУТД», 2014. – 82 с. : ил.
58. Пушнов А., Витковская Р. Гидродинамика слоя насыпной насадки в форме колец Мёбиуса // Energetika. – 2013. – № 2 (59). Р. 77-82.
59. Пушнов А., Петрашова Е., Шинкунас С. Аэротермические испытания регулярной насадки из гофрированных полимерных труб // Energetika. – 2011. – № 3 (57). – С. 187-193.
60. Пушнов А.С., Лозовая Н.П., Шишов В.И. Влияние высоты регулярной насадки на эффективность охлаждения циркуляционной воды // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2011. – Т. 262. – С.107-112.
61. Пушнов А.С., Чиж К.В. Геометрические характеристики миникольцевых насадок для осуществления тепло- и массообменных процессов // Химическая техника. – 2010. – №7. – С. 12-13.

62. Рамм В.М. Абсорбция газов : Монография. – Изд. 2-е, переработ. и доп. – М. : «Химия», 1976. – 654.
63. 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.
64. Рыжов С.О., Бальчугов А.В., Кузора И.Е. Гидродинамические исследования цепной насадки // Химическая промышленность сегодня. – 2013. – № 2. – С. 34-42.
65. Рыжов С.О. Интенсификация десорбции диоксида углерода из водных растворов на высокоэффективной регулярной насадке : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Рыжов Станислав Олегович. – М., 2013. – 21 с.
66. Рябчук Г.В., Трусков С.А., Уютова Э.И., Селезнева Е.А. Гидродинамика плёночных абсорберов с регулярной насадкой // Известия ВолгГТУ: Межвуз. сб. науч. ст. (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии». Вып. 2). – 2009. – №1 (104). – С. 54-56.
67. Семенов Д.Л., Фарахов М.И., Шигапов И.М., Маряхин Н.Н. Гидродинамические исследования нерегулярной насадки «Инжехим-2004» // Электронный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ». – 2004. – С. 1216-1221.
68. Сикорская Е.М., Дорошенко А.В., Липа А.И. Интенсификация процессов тепломассопереноса в контактных воздухоохладителях и вентиляторных градирнях // Холодильная техника. – 1988. – № 8. – С. 28-33.
69. Скачков И.В., Бальчугов А.В., Кузора И.Е., Коробочкин В.В. Определение гидравлического сопротивления ленточной насадки // Химическая промышленность сегодня. – 2013. – № 11. – С. 45-50.

70. Скачков И.В., Бальчугов А.В., Рыжов С.О. Гидродинамические исследования технологии газожидкостных процессов на новой регулярной насадке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 3 (35). – С. 147-150.
71. Сугак Е.В. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами : Монография / Е.В. Горбаневский, Н.А. Войнов, Н.А. Николаев; – 2-е изд. – Казань : «Отечество», 2009. – 224 с.
72. Тарабанов М.Г. Влажный воздух : Справочное пособие. М.: «АВОК-ПРЕСС», 2004. – 42 с.
73. Трифонов Ю.Я. Стекание вязких плёнок по волнистым поверхностям // Прикладная механика и техническая физика. – 2004. – № 9 (45). – С.97-110.
74. Туз В.Е., Лебедь Н.Л., Лебедь И.К. Гидродинамика сепарационных устройств технологического оборудования АЭС // Ядерна та радіаційна безпека. – 2014. – № 2 (62). – С. 22-25.
75. Туз В.Е., Письменный Е.Н., Лебедь Н.Л. Тепло- и массообмен в каналах с сеточным покрытием плёнки жидкости при противоточном движении газа // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 4 (40). – С. 63-68.
76. Уваров В.А., Юдин А.И., Семиненко А.С. Энергоэффективный нагрев технологической воды тепличного хозяйства / В.А. Уваров, А.И. Юдин, А.С. Семиненко // Perspective innovation in science, education, production and transport 2013 [Электронный ресурс]. – Архивы индивидуальных конференций. – 2013. – Режим доступа : <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/conference/the-content-of-conferences/archives-of-individual-conferences/dec-2013>
77. Фарахов М.И. Энергоресурсосберегающая модернизация установок разделения и очистки газов и жидкостей на предприятиях нефтегазохимического комплекса : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.17.08 / Фарахов Мансур Инсафович. – Казань., 2009. – 32 с.

78. Фарахов М.М., Лаптев А.Г., Фарахов Т.М. Определение коэффициентов массоотдачи в газовой фазе орошаемых насадочных колонн в противотоке // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2014. – № 9. – С. 50-53.
79. Фарахов Т.М., Башаров М.М., Шигапов И.М. Гидравлические характеристики новых высокоэффективных нерегулярных теплообменных насадок // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 2. – С. 192-207.
80. Фаткулин Р.Н. Разработка двутавровой насадки для массообменных процессов в системах газ-жидкость : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Фаткулин Раиль Наилевич. – М., 2004. – 24 с.
81. Федяев В.Л., Власов Е.М., Гайнуллин Р.Ф. Эффективность оросительных градирен // Вестник МАХ. – 2012. – № 35-39.
82. Хайдаров Г.Г., Хайдаров А.Г., Машек А.Ч., Майоров А.Е. Влияние температуры на поверхностное натяжение // Вестник СПбГУ. Сер. 4. – 2012. – №1. – С. 24-28.
83. Харитонов А.А. Испарительное охлаждение в регулярном комбинированном контактном устройстве градирни : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Харитонов Антон Александрович. – М., 2013. – 16 с.
84. Холпанов Л.П. Гидродинамика и теплообмен с поверхностью раздела : Монография / Л.П. Холпанов, В.Я. Шкадов. – М. : Наука, 1990. – 271 с.
85. Цурикова Н.П. Влияние высоты блока регулярной насадки на процесс испарительного охлаждения в вентиляторных градирнях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Цурикова Наталья Петровна. – Москва., 2013. – 24 с.
86. Цурикова Н.П., Пушнов А.С. Короткослоевая насадка для осуществления процесса испарительного охлаждения в градирне // Ресурсосберегающие и энергоэффективные технологии в химической и нефтехимической

- промышленности: тезисы докладов третьей международной конференции Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2011. – С. 96-98.
87. Шагарава А.А., Черикова К.В. Экспериментальные исследования гидродинамики аппаратов с насадкой переменной проницаемости // Известия ВолгГТУ: Межвуз. сб. науч. ст. (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии». Вып. 6). – 2013. – №1 (104). – С. 99-103.
88. Шишлянников В.В., Голованчиков А.Б., Дорохина Т.Б., Осетрова Т.А. Экспериментальное исследование влияния формы, размеров и материала насадки на гидравлическое сопротивление // Известия ВолгГТУ: Межвуз. сб. науч. ст. (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии». Вып. 5). – 2012. – №1 (88). – С. 53-55.
89. Шрайбер А.А., Дубовский В.В., Подвысоцкий А.М. Обобщение опытных данных по теплообмену плёнки жидкости, стекающей по гладким и профилированным поверхностям, с воздухом // Промышленная теплотехника. – 2010. – № 4 (32). – С. 21-27.
90. Чуракова С.К. Разработка энергосберегающих технологий нефтегазопереработки на основе перекрёстноточных насадочных контактных устройств: автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.17.07 / Чуракова Светлана Константиновна. – Уфа., 2014. – 48 с.
91. Agarwal C. Sensitivity analysis for counter flow cooling tower-part 1, exit cold water temperature // International journal of applied engineering and technology. – 2012. – № 3 (2). – P. 5-9.
92. Bessou V., Rouzineau D., Prevost M., François A., Dumont C., Maumus J.P., Meyer M. Performance characteristics of a new structured packing // Chemical engineering science. – 2010. – № 65. – P. 4855-4865.
93. Chemical process equipment selection and design; third edition / [James R. Couper and other]. – Elsevier, 2012. – 838 p.

94. Cooke J.J., Gu S., Armstrong L.M., Luo K.H. Gas-liquid flow on smooth and textured inclined planes // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. – 2012. – №6 (8). – P. 1446-1453.
95. Darakchiev S.R. Gas flow maldistribution in columns packed with HOLPACK packing / Bulgarian chemical communications. – 2010. – №4 (42). – P. 323-326.
96. Dedović A., Šikalo Š. Experimental investigation of heat and mass transfer from a falling liquid film // 18th International research/expert conference “Trends in the development of machinery and associated technology”. – 2014. – P. 197-200.
97. Doroshenko A.V., Vasyutynsky S.I. The modernization of heat and mass transfer apparatus for energy systems // Problemele energeticii regionale. – 2008. – №2 (7). – P. 50-54.
98. Ghadiri Dehkordi B., Mehrabadi A. Turbulent free surface flow over semicircular and circular obstacle in a duct // Mechanika. – 2012. – № 5 (18). – P. 539-545.
99. Gorodilov A.A., Pushnov A.S., Berengarten M.G. Improving the design of grid packing // Chemical and Petroleum Engineering. – 2014. – № 1-2 (50). – P. 84-90.
100. 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.
101. Hayder J. Kurji Experimental and theoretical study for a counter flow water cooling tower by using (clear P.V.C.) packing // Journal of kerbala university. – 2012. – № 3 (10). – P. 27-39.
102. Hoffmann A., Ausner I., Repke U., Wozny G. Fluid dynamics in multiphase distillation processes in packed towers // Computers and chemical engineering. – 2005. – № 6 (29). – P. 1433-1437.

103. Jasem H. Alsuwaidi, Omar R. Al Hamdan, Hammad M.M.I. Natural draft cooling tower performance evaluation // International journal of scientific & engineering research. – 2015. – № 4 (6). – P. 1499-1512.
104. Kassim A.N.S., Rasheed Basim A. Investigation of the thermal performance of a cross-flow water cooling tower with different packing // Journal of Engineering. – 2008. – № 1 (14). – P.2290-2300.
105. Kolev N.N., Ljutzkanon L.A., Kolev D.N. Djhonova-Atanasova D.B., Razkazova-Velkova E.N. New technology for purification of the flue gas from sulfur dioxide // Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies. – 2011. – № 5 (1). – P. 375-382.
106. Kuzmenko I., Prokopets R. Experimental and theoretical investigation of mass transfer in a cooling tower // Energetika. – 2014. – № 1 (60). – P. 27-35.
107. Lozano Aviles M. Experiments on falling film evaporation of a water-ethylene glycol mixture on a surface with longitudinal grooves. Doktor der Ingenieurwissenschaften Dr.-Ing. Berlin: Technischen Universität Berlin, 2007.
108. Maćkowiak J. Fluid dynamics of packed columns; principles of the fluid dynamic of column for gas/liquid and liquid/liquid systems. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 355 p.
109. Pavlenko A., Pecherkin N., Chekhovich V., Volodin O. Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry // Microgravity Sci. Technology. – 2009. – №1 (21). – P. 207.
110. Petruchik A.I., Fisenko S.P. Mathematical modeling of evaporative cooling of water films in water-cooling towers // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 1999. – № 1 (72). – P. 43-49.
111. Ramkumar R., Ragupathy A. Experimental study of cooling tower performance using ceramic tile packing // Processing and Application of Ceramics. – 2013. – № 1 (7). – P. 21-27.
112. Ramkumar R., Ragupathy A. Optimization of cooling tower performance analysis using Taguchi method // Thermal science. – 2013. – № 2. – P. 457-469.

113. Vias A.K., Thakur R. Experimental study of the performance of cross flow regenerator in liquid desiccant cooling system // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2014. – № 4 (9). – 481-489.
114. Yoshiyuki I., Xi C. Development of numerical prediction of liquid film flows on packing elements in absorbers // IHI engineering review. – 2012. – № 2 (44). – P.78-85.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1.

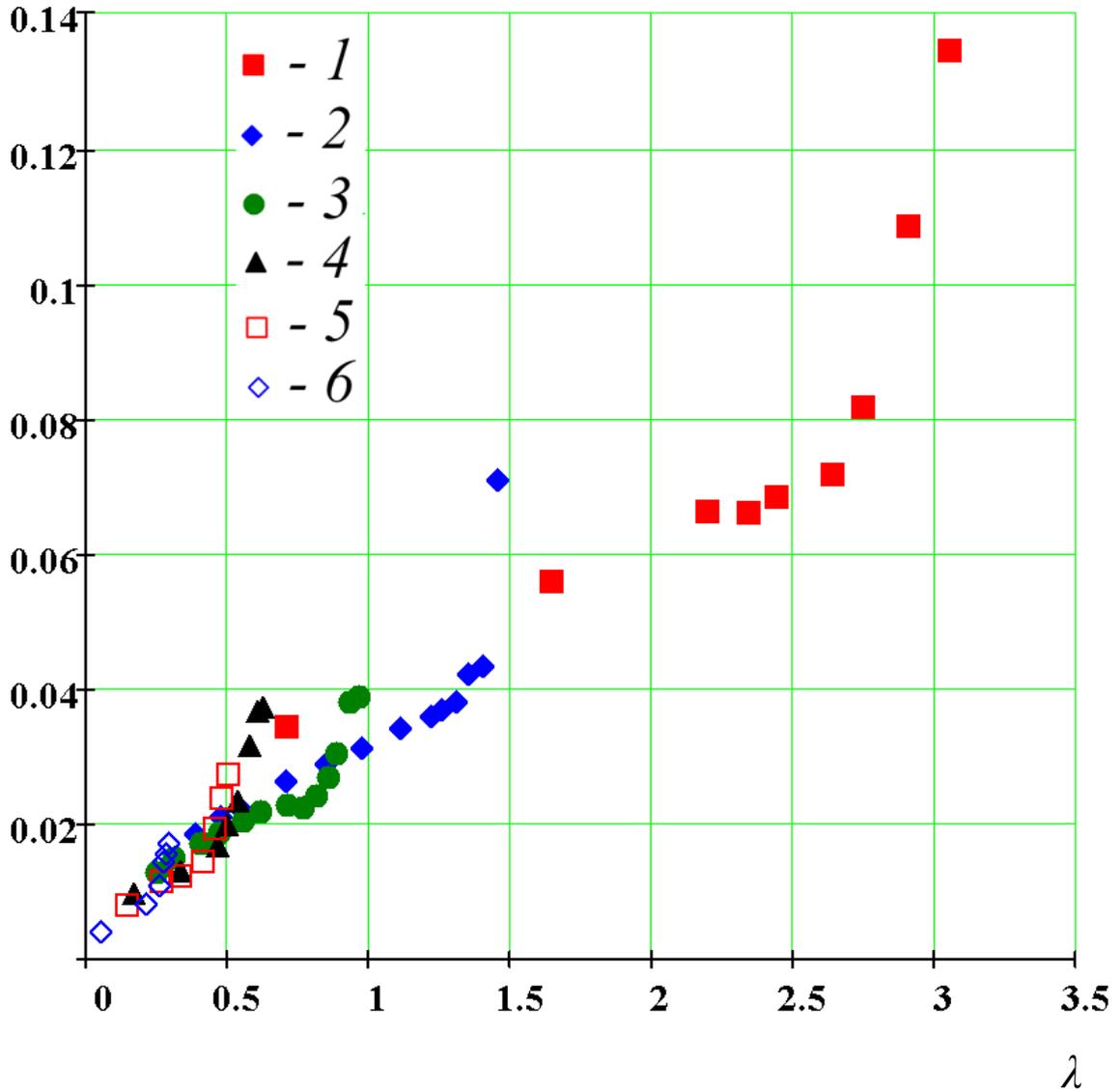
 Me 

Рис. П1. Зависимость критерия Меркеля от относительного расхода при зазоре между элементами насадки 14 мм, и длине элемента насадки 100 мм.

1 – $Re_{пл} = 321$, $q = 19 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$; 2 – $Re_{пл} = 683$, $q = 40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$;
 3 – $Re_{пл} = 1037$, $q = 60 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$; 4 – $Re_{пл} = 1566$, $q = 92 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$;
 5 – $Re_{пл} = 1917$, $q = 112 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$; 6 – $Re_{пл} = 3321$, $q = 194 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$

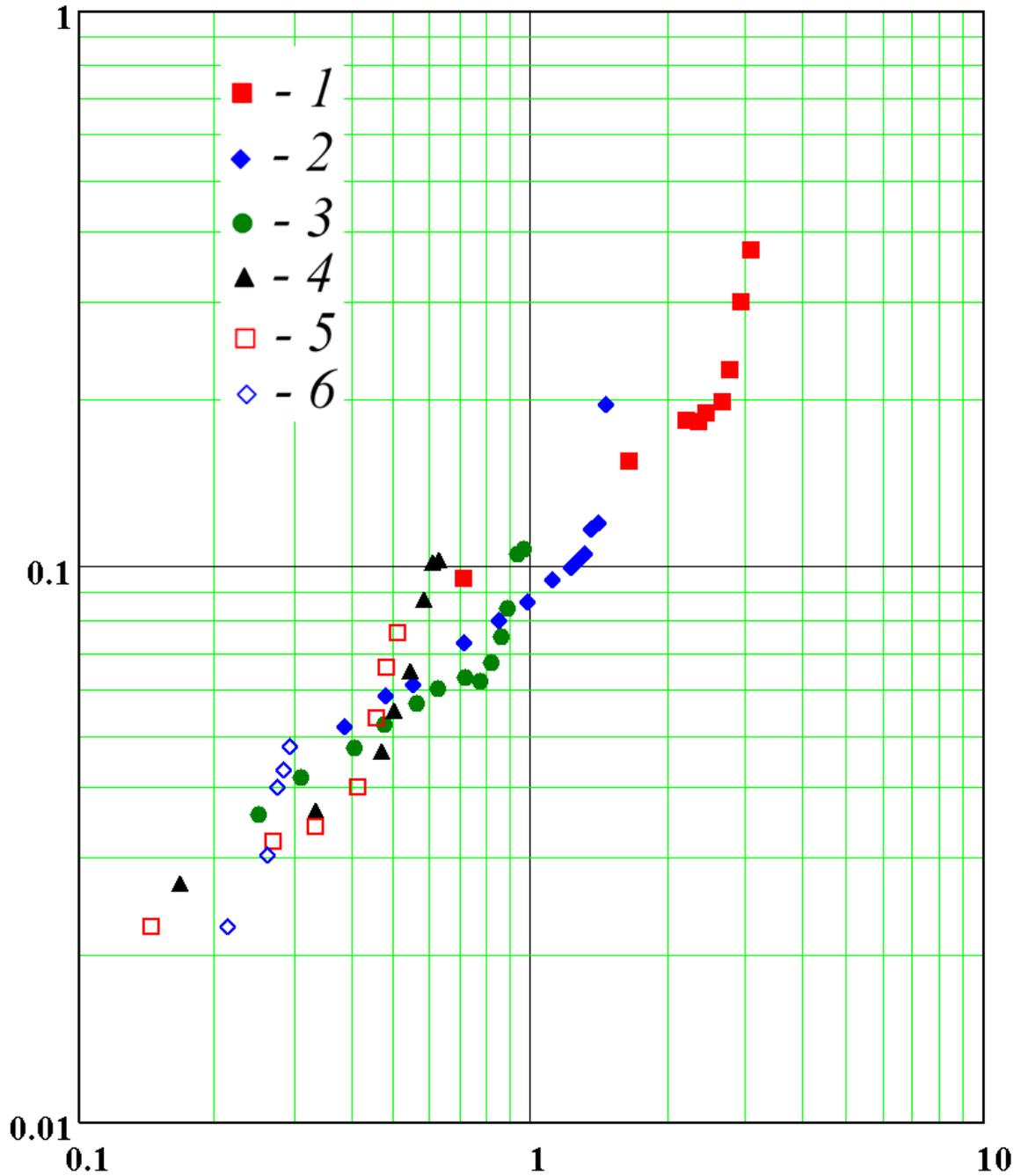
$\beta_V/q, 1/\text{M}$

 λ

Рис. П2. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от относительного расхода при зазоре между элементами насадки 14 мм и длине элемента насадки 100 мм.

1 – $Re_{\text{пл}} = 321$, $q = 19 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$; 2 – $Re_{\text{пл}} = 683$, $q = 40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$;
 3 – $Re_{\text{пл}} = 1037$, $q = 60 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$; 4 – $Re_{\text{пл}} = 1566$, $q = 92 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$;
 5 – $Re_{\text{пл}} = 1917$, $q = 112 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$; 6 – $Re_{\text{пл}} = 3321$, $q = 194 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$

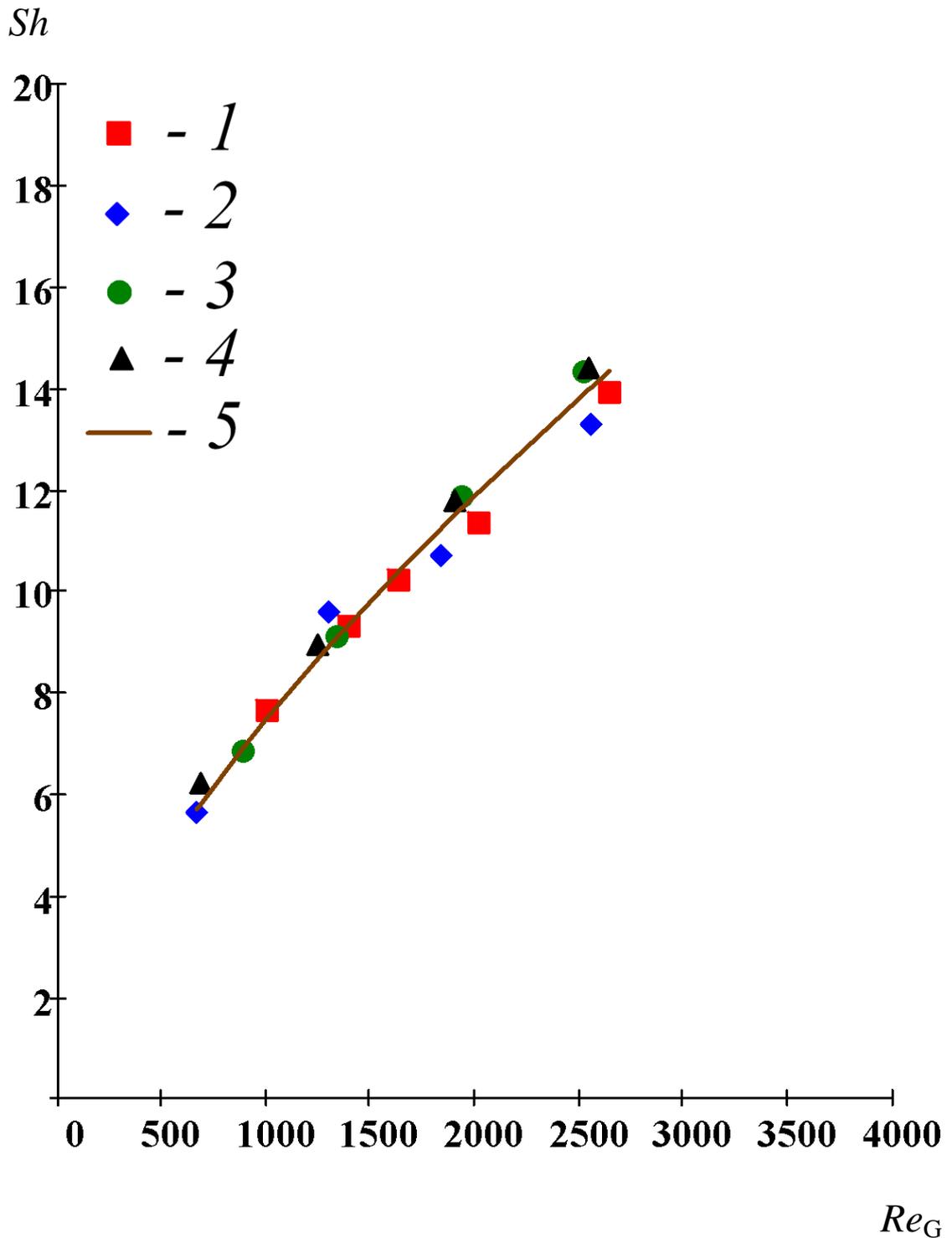


Рис. ПЗ. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по массообмену на ГПН насадке при зазоре между элементами насадки 17 мм, и длине элемента насадки 52 мм.

1 – $Re_{пл} = 922$; 2 – $Re_{пл} = 1594$; 3 – $Re_{пл} = 2491$; 4 – $Re_{пл} = 3542$;
5 – расчет по уравнению (4.18)

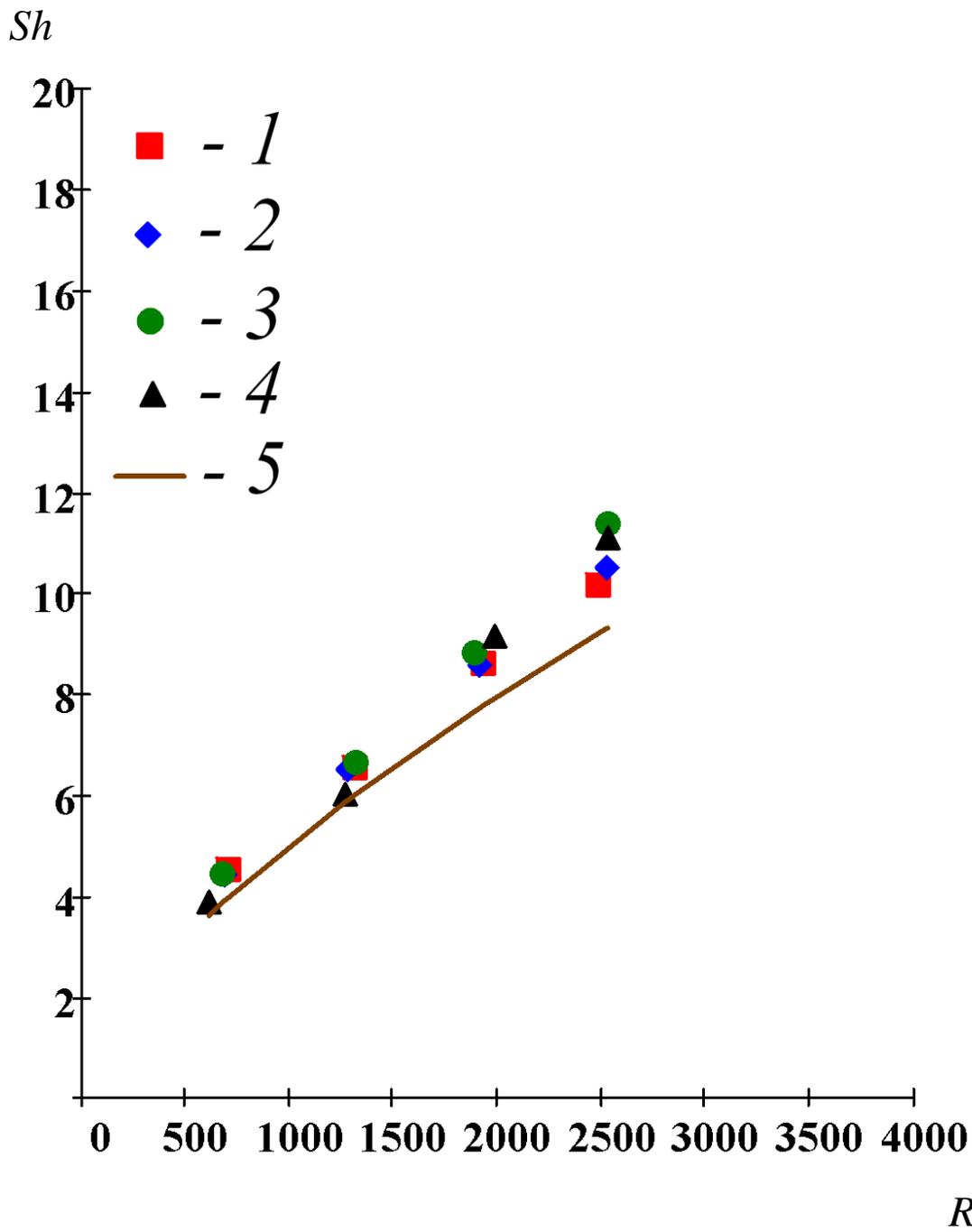


Рис. П4. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по массообмену на ГПН насадке при зазоре между элементами насадки 17 мм, и длине элемента насадки 100 мм.

1 – $Re_{пл} = 1091$; 2 – $Re_{пл} = 1525$; 3 – $Re_{пл} = 2552$; 4 – $Re_{пл} = 3258$;

5 – расчет по уравнению (4.18)

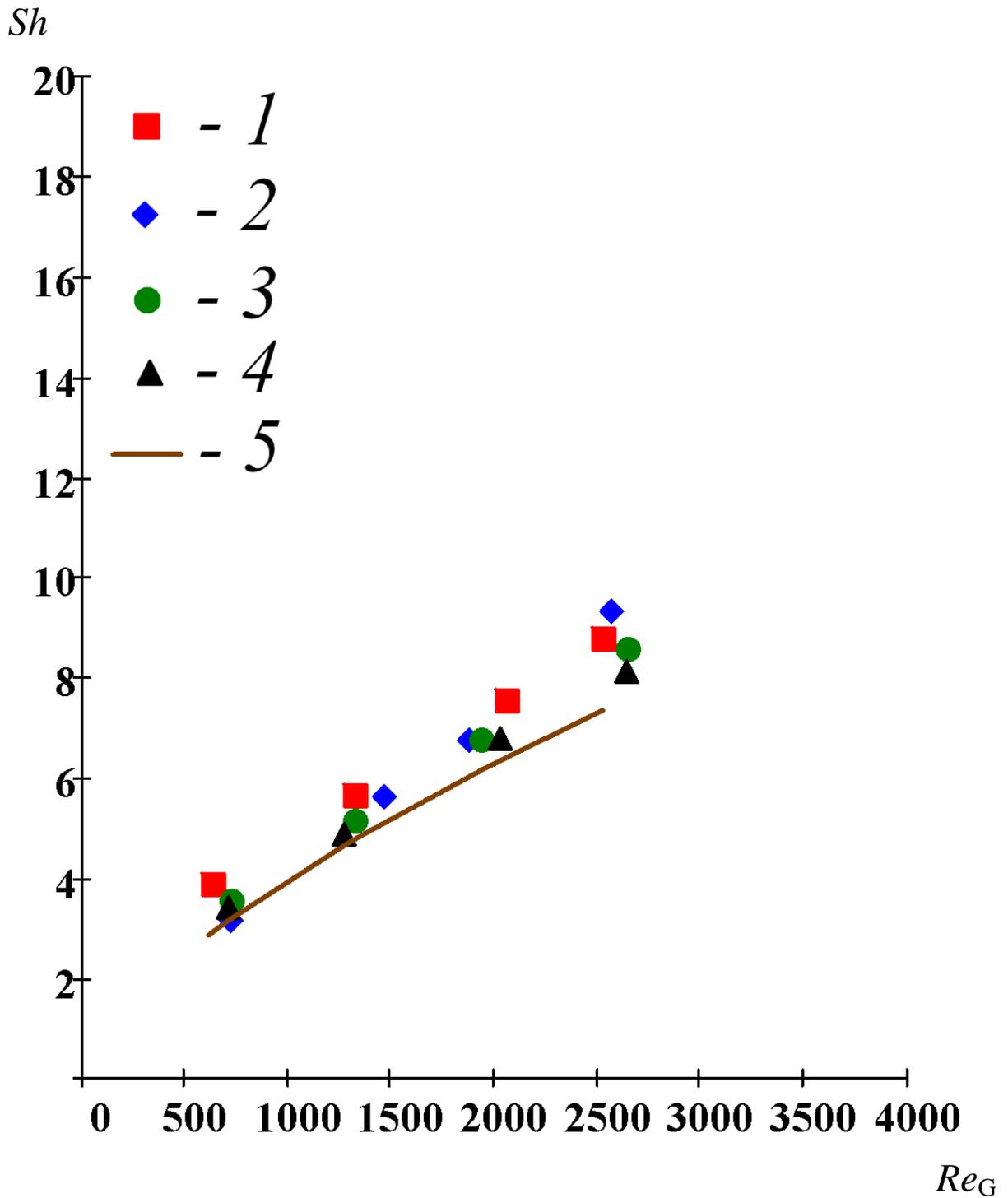


Рис. П5. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по массообмену на ГПН насадке при зазоре между элементами насадки 17 мм, и длине элемента насадки 150 мм.

1 – $Re_{пл} = 884$; 2 – $Re_{пл} = 1169$; 3 – $Re_{пл} = 1535$; 4 – $Re_{пл} = 2191$;

5 – расчет по уравнению (4.18)

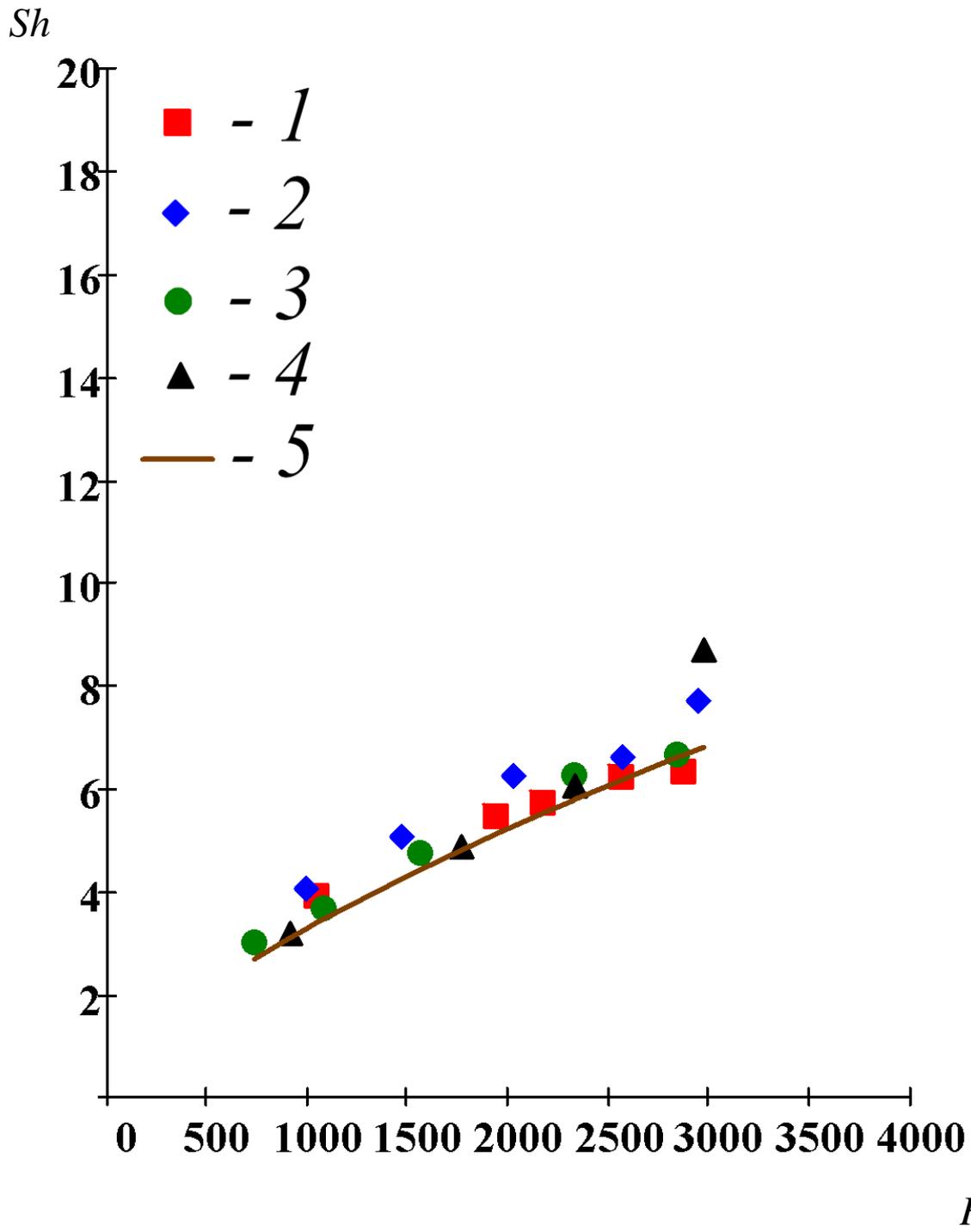


Рис. Пб. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по массообмену на ГПН насадке при зазоре между элементами насадки 17 мм, и длине элемента насадки 200 мм.

1 – $Re_{пл} = 1134$; 2 – $Re_{пл} = 1182$; 3 – $Re_{пл} = 1772$; 4 – $Re_{пл} = 1961$;
 5 – расчет по уравнению (4.18)

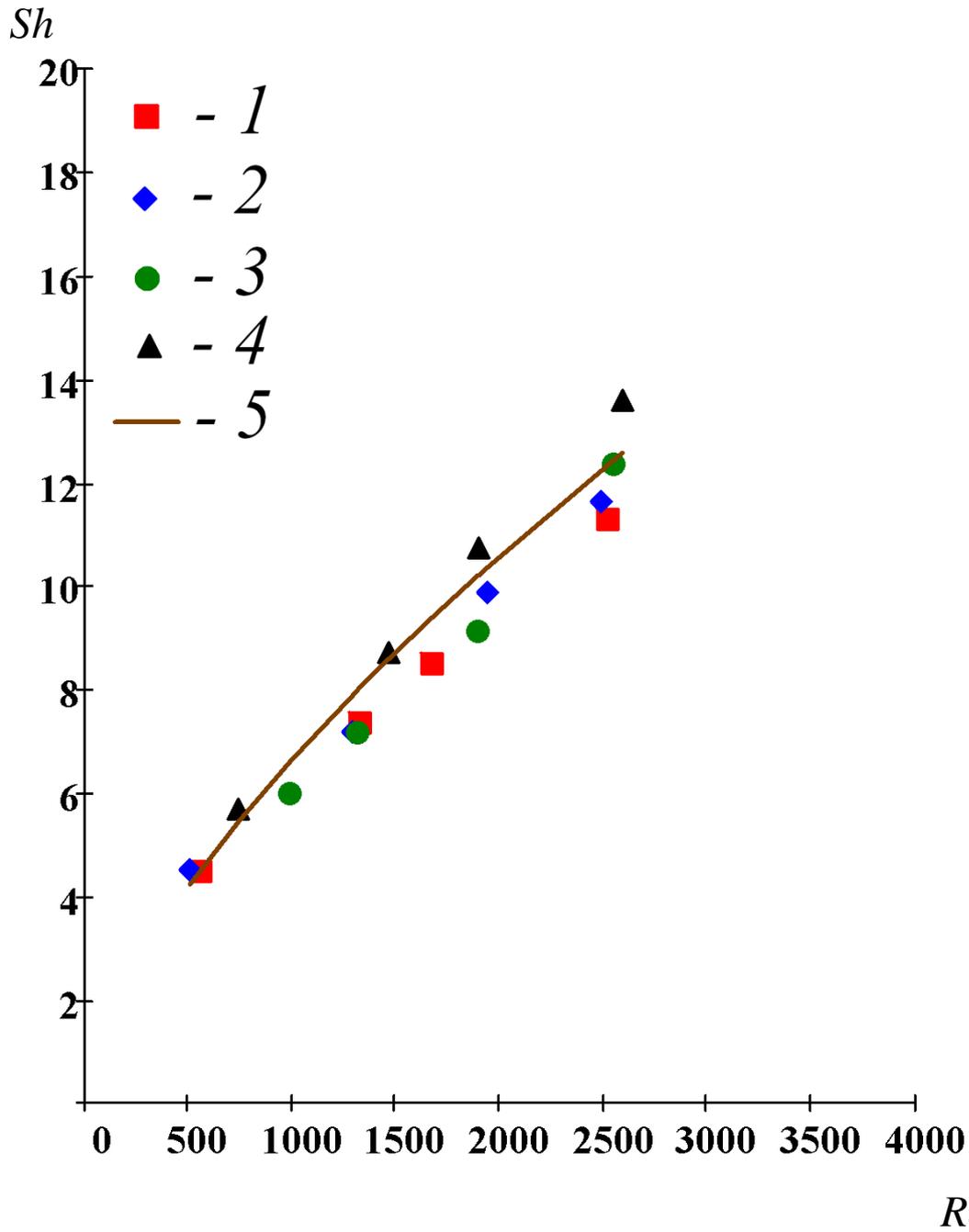


Рис. П7. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по массообмену на ГПН насадке при зазоре между элементами насадки 14 мм, и длине элемента насадки 52 мм.
 1 – $Re_{пл} = 958$; 2 – $Re_{пл} = 1355$; 3 – $Re_{пл} = 1850$; 4 – $Re_{пл} = 3258$;
 5 – расчет по уравнению (4.18)

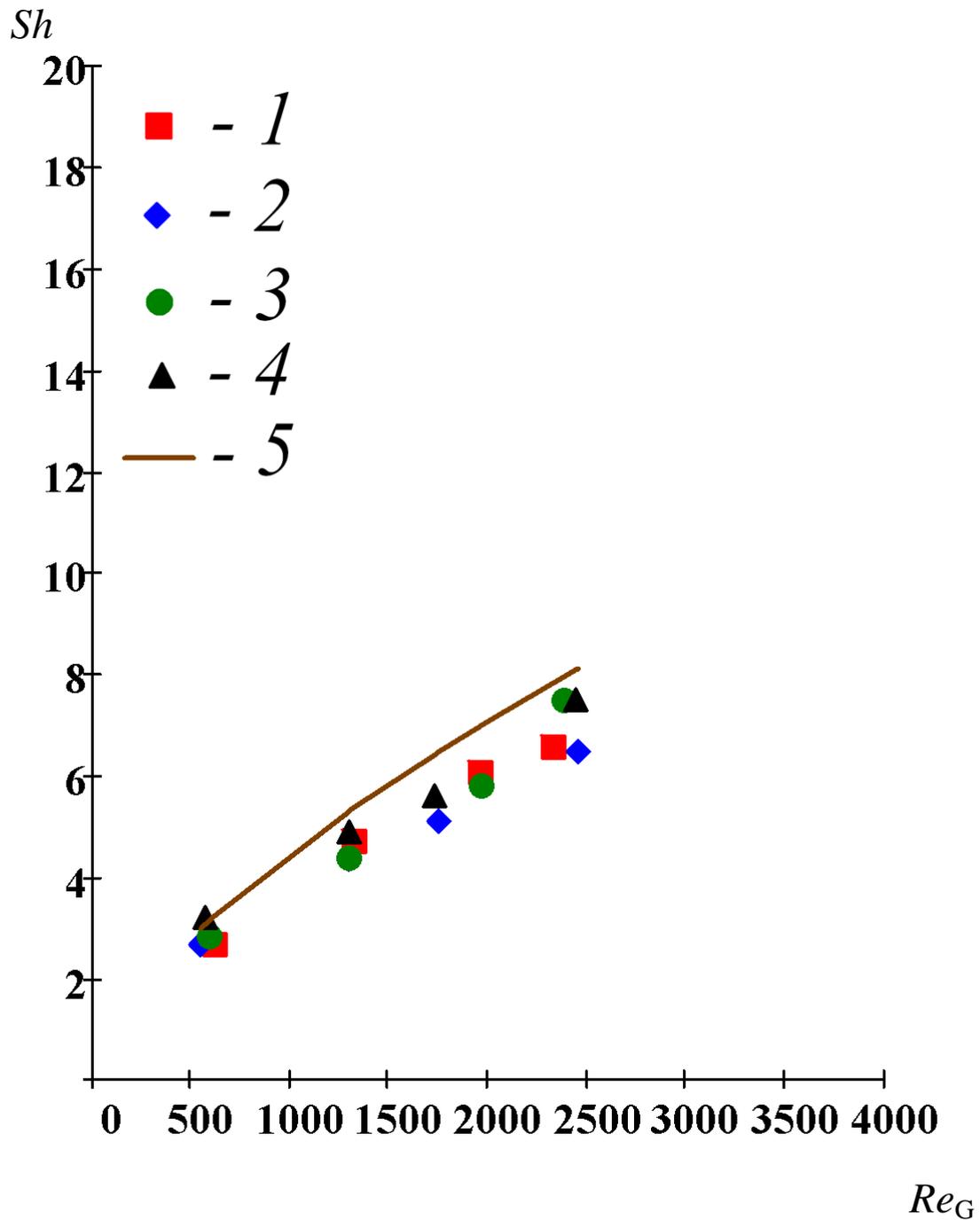


Рис. П8. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по массообмену на ГПН насадке при зазоре между элементами насадки 14 мм, и длине элемента насадки 100 мм.
 1 – $Re_{пл} = 883$; 2 – $Re_{пл} = 1463$; 3 – $Re_{пл} = 1930$; 4 – $Re_{пл} = 2373$;
 5 – расчет по уравнению (4.18)

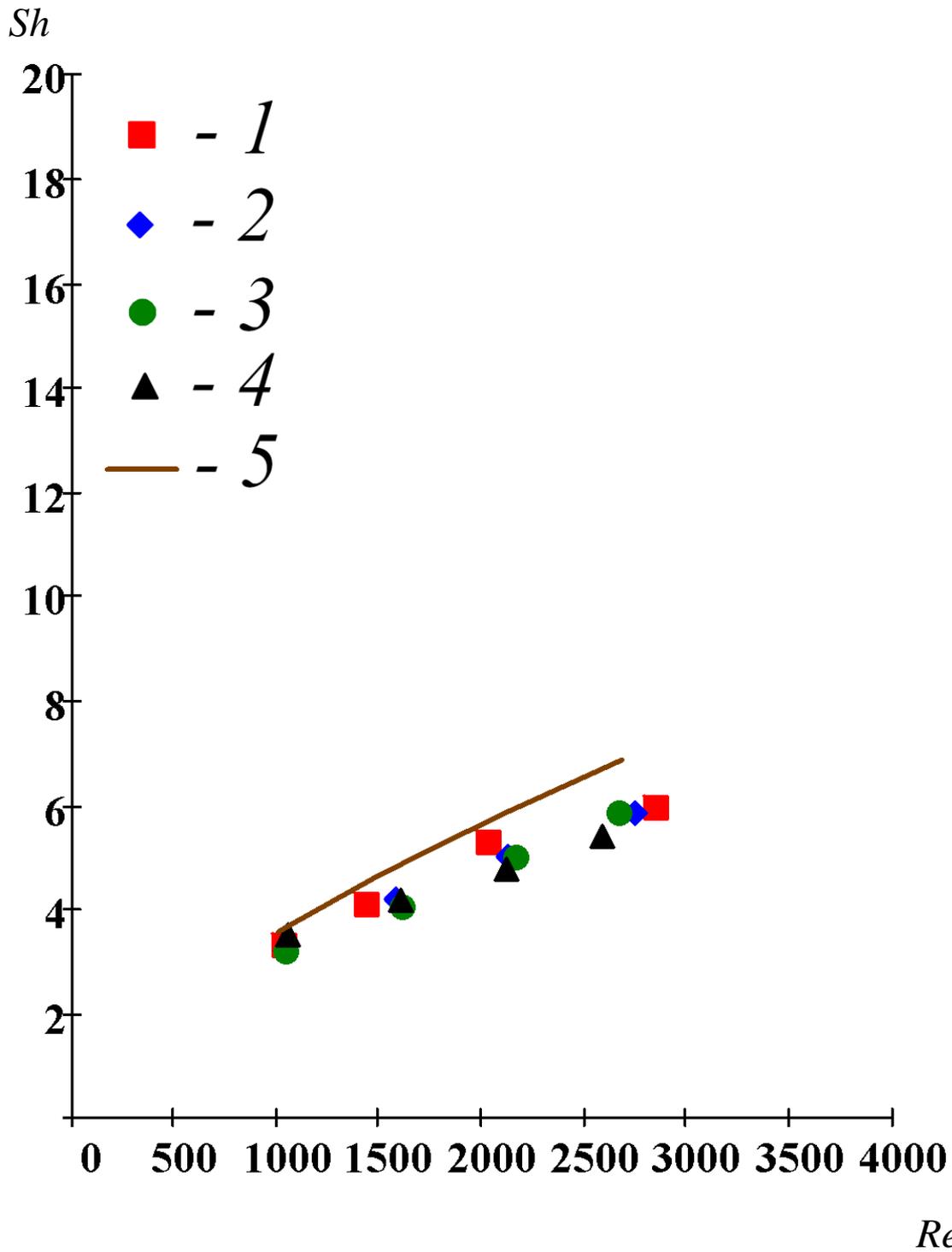


Рис. П9. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по массообмену на ГПН насадке при зазоре между элементами насадки 14 мм, и длине элемента насадки 150 мм.

1 – $Re_{пл} = 889$; 2 – $Re_{пл} = 1330$; 3 – $Re_{пл} = 1504$; 4 – $Re_{пл} = 2192$;
 5 – расчет по уравнению 4.18.

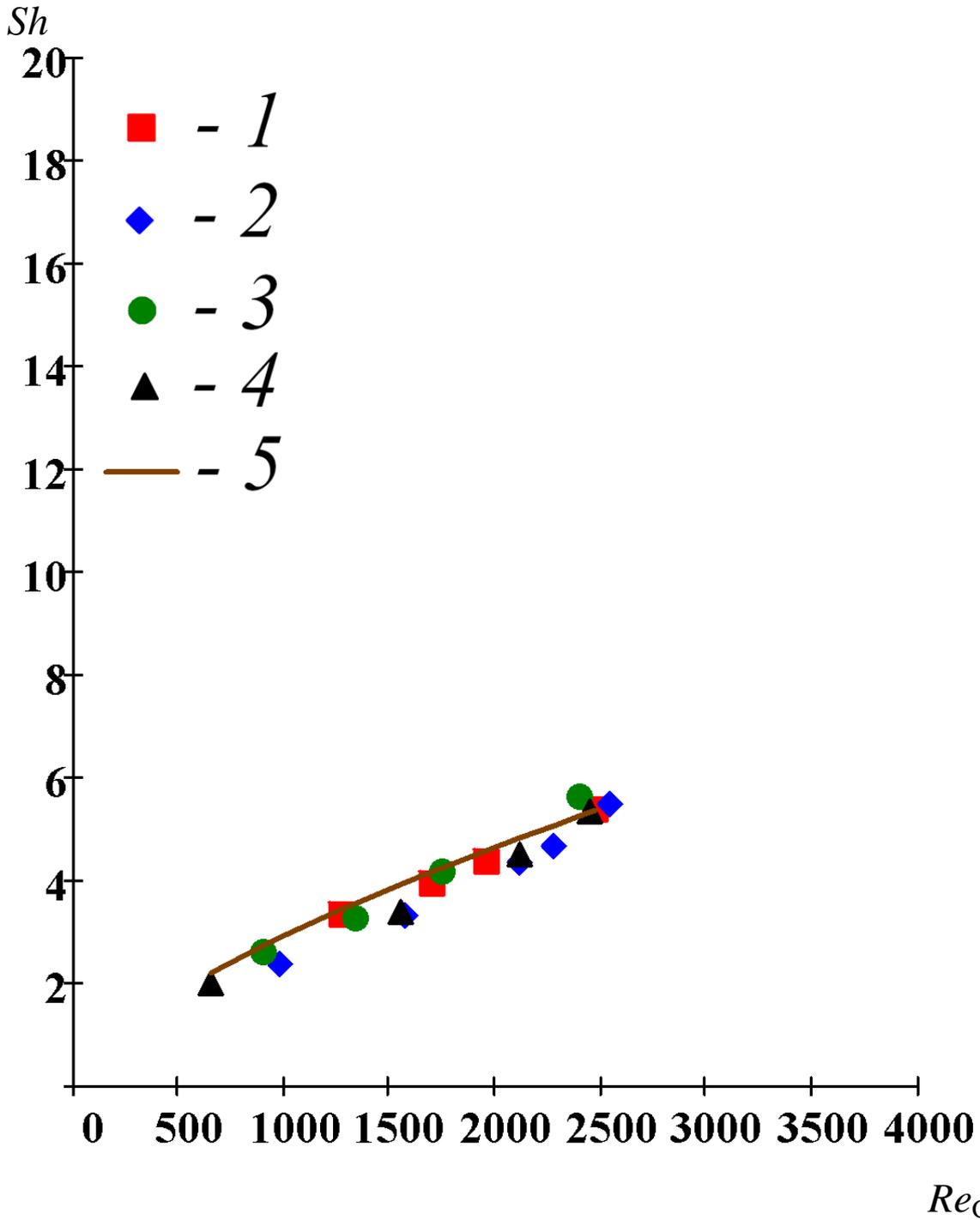


Рис. П10. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по массообмену на ГПН насадке при зазоре между элементами насадки 14 мм, и длине элемента насадки 200 мм.

1 – $Re_{пл} = 432$; 2 – $Re_{пл} = 849$; 3 – $Re_{пл} = 1622$; 4 – $Re_{пл} = 2065$;
 5 – расчет по уравнению 4.18.

Приложение 2



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Каскад»
Кандидат технических наук

А.В. Макаров
А.В. Макаров
«20» ноября 2015 г.

АКТ

об использовании результатов
кандидатской диссертационной работы
Городилова Александра Андреевича

Комиссия в составе:

председатель: Андрей Васильевич Макаров,

члены комиссии: Алексей Андреевич Макаров, Максим Андреевич Макаров

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Интенсификация процесса теплообмена в контактных аппаратах с регулярной насадкой», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в проекте автоматизированного стенда ООО «Каскад» для исследования испарительного охлаждения воды в виде экспериментальных данных и методики расчета.

Использование указанных результатов позволяет повысить качество проектирования а также затраты на проведение работ.

Председатель комиссии *А.В. Макаров* Ген. директор, канд. техн. наук А.В. Макаров

Члены комиссии: *А.А. Макаров* Технический директор А.А. Макаров

М.А. Макаров Зам. ген. директора М.А. Макаров

Приложение 3



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 федеральное государственное
 бюджетное образовательное учреждение
 высшего образования
 «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
 ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
 И ДИЗАЙНА»
 (СПбГУПТД)

Б. Морская ул., д. 18, Санкт-Петербург, 191186
 Тел. (812) 315-75-25 Факс (812) 571-95-84
 E-mail: rector@sutd.ru http://www.sutd.ru

№ _____
 на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

проректор по учебной работе

Рудин А.Е.

« 18 » декабря 2014 года.

АКТ

внедрения в учебный процесс кафедры инженерной химии и промышленной экологии Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна результатов диссертации Городилова Александра Андреевича на тему
 «Интенсификация процесса теплообмена
 в контактных аппаратах с регулярной насадкой»

Мы, нижеподписавшиеся, комиссия в составе председателя заведующего кафедрой инженерной химии и промышленной экологии, канд. техн. наук, профессора Бусыгина Н.Ю. и членов: зам. заведующего по учебной работе кафедры канд. техн. наук Шаханова В. Д. и ответственного исполнителя д-ра техн. наук, профессора Витковской Раисы Федоровной удостоверяем, что результаты диссертационного исследования Городилова Александра Андреевича, а именно, методика расчета контактного аппарата с гофрировано-просечной насадкой внедрены в учебный процесс кафедры при разработке учебного пособия «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 «СПбГУПТД», 2014. – 82 с.» для

студентов дневной, очно-заочной и заочной форм обучения, проходящих подготовку по направлению 20.03.01 (280700.62), 20.04.01 (280700.68) – Техносферная безопасность.

Председатель:

И. о. заведующего кафедрой
инженерной химии и промышленной
экологии, канд. техн. наук, профессор

Бусыгин Н.Ю.

Члены комиссии:

Зам. Заведующего по учебной работе кафедры
Канд. техн. наук, доцент

Шаханов В. Д.

Ответственный исполнитель
Д-р. техн. наук, профессор

Витковская Р.Ф.

Подписи Бусыгина Н.Ю., Шаханова В.Д., Витковской Р.Ф.
заверено

Ведущий специалист
по кадрам управления кадров



Бегунова И.В.

Приложение 4

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2533722

**РЕГУЛЯРНАЯ НАСАДКА ДЛЯ ТЕПЛО- И
МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)" (RU)*

Автор(ы): *с.м. на обороте*

Заявка № 2013142009

Приоритет изобретения **16 сентября 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **23 сентября 2014 г.**

Срок действия патента истекает **16 сентября 2033 г.**

*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий



Приложение 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 152293

**ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ НАСАДОЧНЫЙ
ТЕПЛОМАСООБМЕННЫЙ АППАРАТ**Патентообладатель(ли): *Городилов Александр Андреевич (RU)*Автор(ы): *Городилов Александр Андреевич (RU), Пушкин
Александр Сергеевич (RU), Беренгартен Михаил Георгиевич
(RU)*

Заявка № 2014128250

Приоритет полезной модели 10 июля 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 22 апреля 2015 г.

Срок действия патента истекает 10 июля 2024 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

