

ЮЖНО-КАЗАХСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.АУЭЗОВА

УДК 66.0:662.612.300.24

На правах рукописи

ЕШЖАНОВ АБИЛДА АБДЫКАДЫРОВИЧ

РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ ТЕПЛОМАССОБМЕННОГО АППАРАТА С
КОМБИНИРОВАННОЙ РЕГУЛЯРНО-ВЗВЕШЕННОЙ НАСАДКОЙ

6D072400 - Технологические машины и оборудование

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный руководитель
д.т.н., профессор
Волненко Александр Анатольевич

Зарубежный научный консультант
д.т.н., доцент
Левданский Александр Эдуардович

Республика Казахстан
Шымкент, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	4
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 Современные представления вопросов гидродинамики, массообмена и пылеулавливания в аппаратах со взвешенной и регулярной насадкой.....	13
1.1 Анализ работы аппаратов со взвешенной насадкой и их расчет.....	13
1.2 Анализ работы аппаратов с регулярной подвижной насадкой и их расчет.....	24
1.3 Постановка задач исследований.....	35
2 Гидродинамика аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой.....	37
2.1 Описание технологической схемы экспериментальной установки и методик проведения исследований.....	37
2.2 Конструкции аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой и расчет конструктивных параметров насадки.....	42
2.3 Закономерности взаимодействия газовой и жидкой фаз в контактной зоне комбинированной регулярно-взвешенной насадки.....	51
2.4 Расчет гидродинамических параметров.....	70
2.4.1 Гидравлическое сопротивление.....	70
2.4.2 Количество удерживаемой жидкости и газосодержание слоя.....	71
2.4.3 Структурные составляющие газожидкостного слоя.....	73
2.4.4 Частотные характеристики газожидкостного слоя.....	78
3 Тепломассообмен в аппарате с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой.....	80
3.1 Массо – и теплообменные характеристики аппарата.....	80
3.2 Расчет тепломассообменных характеристик.....	84
3.2.1 Коэффициенты массоотдачи в газовой фазе.....	84
3.2.2 Коэффициенты теплоотдачи.....	88
4 Пылеулавливание в аппарате с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой.....	91
4.1 Методика экспериментального исследования процесса пылеулавливания.....	91
4.2 Влияние режимных параметров на эффективность пылеулавливания.....	92
4.3 Математическая модель турбулентно-диффузионного осаждения твердых частиц.....	93
5 Рекомендации по проектированию и внедрение аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой.....	96
5.1 Рекомендации по проектированию аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой.....	96

5.2	Методики расчета аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой.....	97
5.3	Промышленные испытания и внедрение аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой.....	97
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	102
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	104
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	113

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

- СТ РК 2.30-2017 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Порядок проведения метрологической аттестации средств измерений;
- СТ РК 2.4 - 2017 ГСИ РК. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения;
- СТ РК 2.1-2009 ГСИ РК. Термины и определения;
- СТ РК 2.3-2009 ГСИ РК. Эталоны единиц величин, основные положения, порядок создания, утверждения, хранения, применения и совершенствования;
- СТ РК 2.15-2013 (NEQ). Государственный метрологический контроль и метрологический контроль. Основные положения;
- ГОСТ 7.32-2017 Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.
- ГОСТ 7.1-2003 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.
- ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В диссертационной работе использованы следующие обозначения и сокращения:

A – коэффициент;

a – удельная объемная поверхность контакта фаз, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

B – коэффициент;

C – концентрация, $\text{кг}/\text{м}^3$; коэффициент сопротивления; теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$;

D – диаметр аппарата, м; коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;

d – диаметр насадки, капли, отверстия, частицы, м; влагосодержание, $\text{кг}/\text{кг}$;

F – поверхность, м^2 ; сила Н;

G – массовый расход газа, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$;

g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;

H – высота, м;

h_0 – количество удерживаемой жидкости (КУЖ), м;

h – удерживаемая способность аппарата, $\text{кг}/\text{м}^3$; высота, м;

I – энтальпия газа, $\text{кДж}/\text{моль}$;

K – коэффициент тепло-массопередачи, $\text{м}/\text{с}$; коэффициент; константа;

k – коэффициент;

L – плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2/\text{ч})$; массовый расход жидкости, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$, ($\text{кг}/\text{с}$); размер, м;

ℓ – длина, м;

M – молекулярный вес, $\text{кг}/\text{кмоль}$;

m – масса, кг; величина, $\text{л}/\text{м}^3$; удельное орошение, $\text{м}^3/\text{м}^3$; безразмерное волновое число;

N – мощность, Вт;

n – количество, шт;

P – давление, Па;

ΔP – гидравлическое сопротивление или перепад давления, Па;

Q – расход, $\text{м}^3/\text{с}$;

r – радиус, м;

S – площадь, м^2 ; площадь поперечного сечения, м^2 ;

T – температура, К;

t – шаг размещения насадочных элементов, м; время, с;

$U_{\text{ж}}$ – скорость жидкости, $\text{м}/\text{с}$;

u – истинная (локальная) скорость, $\text{м}/\text{с}$; пульсационная скорость, $\text{м}/\text{с}$;

V – объем, м^3 ;

w – скорость, $\text{м}/\text{с}$;

η – коэффициент; степень очистки;

ζ – коэффициент гидравлического сопротивления;

α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{K}$;

β – коэффициент массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$;

δ – толщина пленки жидкости, м; глубина проникновения завихренности, м;
 ε – порозность насадки;
 θ – коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей; условная температура процесса; температурный напор; время движения капли;
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); длина волн, м;
 μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с;
 ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;
 ρ – плотность, кг/м³;
 σ – поверхностное натяжение, Н/м;
 τ – время, с; касательное напряжение, Па;
 φ – газосодержание, м³/м³; угол, град;
 \mathcal{E} – энергия диссипации, Вт/кг;
 Φ – коэффициент формы капли;
 Z – запыленность потока, г/нм³;
 q – привес пыли в аллонже, г;
 \mathcal{G}_0 – объемная скорость газа при отборе, нм³/с.

Числа:

Fr – число Фруда;
 Pr – число Прандтля;
 Re – число Рейнольдса;
 Sc – число Шмидта;
 Sl – число Струхаля;
 We – число Вебера;
 Stk – число Стокса.

Индексы, сокращения:

в – вихрь; вертикальный;
г – газовая фаза; гидравлический;
 δ – динамическая высота;
ж – жидкая фаза; жидкость;
з – зона;
к – капля; контактная зона; конечная; квадратная;
кр – критическая;
КУЖ – количество удерживаемой жидкости
L – жидкая; орошаемая;
н – насадка; начальная;
ор – орошаемая;
пл – пленка;
р – радиальный;

ср – среднее;
стр – струя;
сух – сухой;
т – тарелка;
тр – труба; трения;
э – элемент; эффективная;
экв – эквивалентный;
яч – ячейка.

Аппараты:

ВН – со взвешенной насадкой;
ВНС – взвешенной насадкой со стабилизатором слоя;
ПН – с подвижной насадкой;
РПН – с регулярной подвижной насадкой;
КН – с колеблющейся насадкой;
ЦН – с циркулирующей насадкой;
ФН – с фонтанирующей насадкой;
ТВ – с трубчато-взвешенной насадкой;
ТФ – с трубчато-фонтанирующей насадкой;
ИТПН – инерционно-турбулентный с подвижной насадкой;
УИД с РПН – ударно-инерционного действия с регулярной подвижной насадкой.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка современного состояния решаемой научной проблемы. Проектирование и ввод в действие новых производств и модернизация существующих ставит перед исследователями задачи создания оборудования с заданными характеристиками по основным показателям. Для теплообменных аппаратов и пылеуловителей такими показателями являются: высокая эффективность, низкие энергозатраты и материалоемкость, простота конструкции и эксплуатации, нечувствительность к загрязнениям обрабатываемых газов и жидкостей и др.

В настоящее время имеется большое количество теплообменных аппаратов и пылеуловителей, работа которых основана на различных механизмах взаимодействия потоков газа и жидкости. В большинстве случаев такими механизмами являются пленочное течение жидкости и барботаж, реализуемые в насадочных (со стационарной насадкой) и тарельчатых аппаратах. На ином механизме – вихревом взаимодействии потоков газа и жидкости основана работа аппаратов с подвижной насадкой (ПН) [1,2,3]. Нерегулируемое вихревое взаимодействие, реализуемое в аппаратах со взвешенной насадкой и регулируемое вихревое в аппаратах с регулярно размещенными насадочными телами позволяет проводить процессы массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания в интенсивных режимах работы с высокой эффективностью.

Основанием для разработки темы явилось отсутствие результатов исследований аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой и научно-обоснованных методик их расчета.

Исходными данными к выполнению работы явились результаты исследований и методики расчетов аппаратов с подвижной насадкой (взвешенной и фонтанирующей), а также аппаратов с регулярной подвижной насадкой и в первую очередь аппарата с трубчатой насадкой регулярной структуры.

Обоснованием необходимости проведения научно-исследовательской работы послужила необходимость создания аппарата для обработки газовых потоков, содержащих твердые частицы с повышенными адгезионными свойствами.

Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки. Разработка конструкций аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой и созданные методики расчета базируются на научных открытиях [4,5] о закономерностях вихревого взаимодействия фаз, фундаментальных законах механики жидкости и газа, теорий теплообмена и пылеулавливания, что свидетельствует о высоком научно-техническом уровне разработки.

Сведения о патентных исследованиях. При разработке конструкций аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой патентные исследования проведены на глубину свыше сорока лет по СССР и России,

США, Франции, Германии, Великобритании, Японии. Проведенный поиск позволил сделать выводы о достоинствах и недостатках известных способов и конструкций аппаратов, а сопоставительный анализ результатов патентных исследований сделать заключение, что предлагаемая новая конструкция аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой позволяет повысить эксплуатационную надежность, интенсивность и эффективность работы в процессах массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания.

Сведения о метрологическом обеспечении научно-исследовательской работы. В основу диссертационной работы положена официальная терминология Международной организации законодательной метрологии. В процессе проведения экспериментов использованы приборы, прошедшие государственную поверку в период эксплуатации, обеспечивающие соответствующий исследовательским и инженерным целям класс точности и соответствующие «Закону об обеспечении единства измерений». В экспериментальных исследованиях использованы методики выполнения измерений, соответствующие «Закону об обеспечении единства измерений». В функциональных и графических зависимостях использованы единицы измерений, соответствующие системе СИ.

Актуальность проблемы. Аппараты с подвижной насадкой (взвешенной и фонтанирующей) получили распространение в промышленности благодаря простоте конструкции и нечувствительности к загрязненности газожидкостной среды твердыми примесями. Однако их существенным недостатком является значительное гидравлическое сопротивление, основную долю которого составляют затраты энергии на подъем насадочных элементов и поддержание их во взвешенном состоянии.

При регулярном размещении насадочных элементов на струнах в объеме контактной зоны гидравлическое сопротивление значительно снижается и при этом, за счет реализации регулируемого вихревого взаимодействия, значительно интенсифицируются проводимые процессы.

Вместе с тем, при проведении процессов пылеулавливания с частицами пыли, обладающими повышенными адгезионными свойствами, а также в некоторых массообменных процессах (например, в производстве кальцинированной соды аммиачным способом в процессах абсорбции аммиака и углекислого газа раствором хлорида натрия) происходит выпадение тонкодисперсных твердых частиц, отлагающихся на насадочных элементах и стенках аппарата, в результате чего возможно зарастание насадочного слоя, приводящего к нарушению синфазного режима, а, следовательно, к значительному снижению эффективности проводимых процессов.

Для проведения таких процессов созданы конструкции аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой [6,7]. Однако результаты исследований таких аппаратов отсутствуют.

В связи с этим, проведение исследований, разработка методологии расчета и проектирования аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной

насадкой применительно к процессам массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания, рекомендаций по их эксплуатации являются актуальными.

Работа выполнялась в соответствии с направлением исследований по госбюджетной НИР ЮКГУ им. М.Ауэзова «Разработка методики конструирования и расчета высокоэффективных тепломассообменных аппаратов и устройств общепромышленного назначения» на 2016-2020 г.г.

Объект и предмет. Объектами исследования явились лабораторные и промышленные установки с аппаратами с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой.

Предметом исследований явились гидродинамические закономерности, процессы массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания.

Методологической базой явились методы статистической обработки фотографий для исследования структурных составляющих жидкой фазы, методы физических исследований для получения опытных коэффициентов массоотдачи в газовой фазе, теплоотдачи и эффективности пылеулавливания.

Цель работы: разработка научных основ процессов массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания в аппаратах с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой, создание научно-обоснованных методов их расчета и проектирования и апробация полученных результатов в опытно-промышленных условиях с реализацией в промышленности.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- изучение закономерностей взаимодействия газовой и жидкой фаз в контактной зоне комбинированной регулярно-взвешенной насадки с помощью визуального наблюдения и статистической обработки фотографий структуры слоя;

- получение расчетных зависимостей для определения удельной поверхности трубчато - шаровой насадки (трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей), их объемной порозности, а также эквивалентного диаметра;

- экспериментальное исследование гидродинамических характеристик регулярно-взвешенной насадки с одним и двумя слоями шаровой насадки, а также с одной нижней опорно-распределительной решеткой и секционированной несколькими опорно-распределительными решетками;

- экспериментальное исследование гидродинамических характеристик регулярно-взвешенной (трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей) насадки при изменении режимных параметров и получение расчетных зависимостей;

- определение частотных характеристик газожидкостного слоя в объеме комбинированной регулярно-взвешенной насадки и получение уравнения для их расчета;

- экспериментальное исследование процессов массо- и теплообмена в контактной зоне комбинированной регулярно-взвешенной насадки при изменении режимных параметров и получение уравнений для расчета коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи;

- экспериментальное исследование процесса пылеулавливания в аппарате с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой при изменении режимных параметров;

- разработка математической модели турбулентно-диффузионного осаждения твердых частиц и получение формул для расчета коэффициента турбулентной диффузии и эффективности пылеулавливания;

- разработка научно-обоснованной инженерной методики расчета аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой и рекомендаций по проектированию и эксплуатации;

- промышленная апробация результатов исследования.

Научная новизна работы заключается в том, что на основе теоретических и экспериментальных исследований закономерностей вихревого взаимодействия потоков научно обоснована методология расчета аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой для проведения процессов массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания. При этом:

- принимая, что движение газа в объеме насадки осуществляется по извилистым каналам, получены расчетные зависимости для определения удельной поверхности трубчато - шаровой насадки (трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей), их объемной порозности, а также эквивалентного диаметра;

- исходя из выявленных закономерностей вихревого взаимодействия потоков газа и жидкости в объеме регулярно-взвешенной насадки, получены уравнения для расчета гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя;

- с использованием теории о локальной изотропной турбулентности и применяя диссипативный подход, получено уравнение для определения среднего диаметра капель;

- используя единый механизм вихревого обтекания твердых тел и течения фаз через крупные отверстия тарелок, получена частотная характеристика, связывающая частоту истечения струи жидкости при распаде пленки жидкости стекающей с трубчатого элемента с частотой срыва вихря, возникающего при обтекании труб;

- используя подход, основанный на аналогии между трением и массоотдачей, получено уравнение для определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе при малых скоростях газового потока. При повышенных скоростях газа в условиях барботажа уравнение для расчета коэффициентов массоотдачи в газовой фазе получено на основе модели обновления поверхности;

- исходя из аналогии процессов тепло- и массообмена при малых и больших скоростях газового потока получены уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи;

- на основе модели турбулентно-диффузионного осаждения твердых частиц получена формула для расчета коэффициента турбулентной диффузии, которая используется для определения эффективности пылеулавливания.

Практическая ценность работы. Разработана конструкция теплообменного аппарата, защищенная патентом РК на полезную модель №3656 [7].

Разработаны методики расчета, рекомендации по проектированию и эксплуатации аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой для проведения процессов массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания [8].

Результаты исследований, методики расчета, рекомендации по проектированию промышленных аппаратов могут быть использованы преподавателями, инженерно-техническими и научными работниками различных отраслей промышленности, проектных организаций, научно-исследовательских и учебных институтов.

Апробация практических результатов. По результатам проведенных исследований разработана конструкция промышленного аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой, которая внедрена на АО «Актюбинский завод хромовых соединений» в технологической схеме очистки газовых выбросов в процессе окислительного обжига шихты в производстве монокромата натрия. При этом снижена концентрация выбросов пыли и в 34,6 раз уменьшен экономический ущерб.

Кроме того, результаты НИР по созданию аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой и методики расчета внедрены в учебный процесс для проведения лекционных и практических занятий по дисциплине «Современное промышленное оборудование».

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, базирующихся на научных открытиях закономерностей вихревого движения потоков в области механики газа и жидкости, явлений тепло- и массообмена, полностью подтверждены результатами собственных исследований, полученных на лабораторных и промышленных установках, а также сопоставлением с литературными данными.

Научные положения, выносимые на защиту:

- расчетные зависимости для определения удельной поверхности трубчато-шаровой насадки (трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей), их объемной порозности, а также эквивалентного диаметра;
- уравнения для расчета гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя, а также среднего диаметра капель;
- уравнения для определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе при малых скоростях газового потока и капельном движении жидкости. При повышенных скоростях газа в условиях барботажа уравнение для расчета коэффициентов массоотдачи в газовой фазе при движении пузырей;
- уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи;
- формулы для расчета коэффициента турбулентной диффузии и определения эффективности пылеулавливания.

1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВОПРОСОВ ГИДРОДИНАМИКИ, МАССООБМЕНА И ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ В АППАРАТАХ СО ВЗВЕШЕННОЙ И РЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКОЙ

1.1 Анализ работы аппаратов со взвешенной насадкой и их расчет

В настоящее время известно множество разновидностей аппаратов с подвижной насадкой (ПН) [9,10], которые отличаются по типу насадки и характеру ее движения, по конструкции опорно-распределительной решетки, удерживающей сетки, узла подачи газа и жидкости и др.

По характеру движения элементов насадочных тел в рабочем объеме, указанные аппараты подразделяются на следующие основные классы [3]:

- аппараты со взвешенной насадкой (ВН);
- аппараты с фонтанирующей насадкой (ФН);
- аппараты с вращающейся и циркулирующей насадкой (ЦН);
- аппараты с регулярной подвижной насадкой (РПН);
- комбинированные аппараты ПН (КН).

Аппараты ПН относятся к аппаратам с межфазной поверхностью, образующейся в процессе движения фаз, а по организации направления движения взаимодействующих потоков газа и жидкости на тарелке подразделяются на аппараты: с перекрестным движением фаз, противоточным движением фаз и с восходящим прямоточным движением фаз [3 с.29]. Из них наиболее изученными являются противоточные аппараты ПН.

В аппаратах со взвешенной насадкой, элементы насадки, находясь во взвешенном состоянии, совершают хаотичные и пульсационные движения. В объеме газоочистного слоя направление движения и длина пути пробега каждого элемента насадки носят равновероятный и случайный характер [10 с.5].

Аппараты ВН подразделяются на подклассы: аппараты ВН и секционированные аппараты ВН.

Подкласс аппаратов ВН составляют аппараты, которые над опорно-распределительной решеткой в рабочей зоне имеют лишь элементы насадки без дополнительных приспособлений.

При работе аппарата входящий газовый поток проходит через отверстия опорно-распределительной тарелки и приводит в движение элементы насадки. Противотоком движению газа через ороситель поступает орошающая жидкость, которая после взаимодействия с газом выводится через сливной патрубок. Уносимые газовым потоком капли жидкости задерживаются сепарирующим слоем, находящимся над насадочной зоной и очищенный газ выбрасывается через выхлопной патрубок.

В секционированных аппаратах ВН используются различные перегородки, вставки, стабилизаторы или сетки большого свободного сечения, которые делят сечение аппарата и его рабочую зону на отдельные секции. В аппаратах этого подкласса успешно решается вопрос масштабного перехода от лабораторных

моделей к промышленным колоннам без особого изменения эффективности массо- и теплообмена.

В массообменных аппаратах наряду с общеизвестными плоскими применяются и другие виды тарелок, например, волнообразные, гофрированные и т.д. Исследователи аппаратов ПН уделяют большое внимание конструкциям тарелок в виде усеченного конуса или аппаратам конусообразной формы [11]. В тарелках аппаратов перфорирована только часть поверхности, обычно это поверхность нижнего основания конуса. Из-за сужения сечения тарелки, скорость истечения газа через нее немного выше, чем в обычных решетках, поэтому происходит фонтанирование насадки над перфорированной частью тарелки (аппараты ФН). На перфорированных перифериях тарелки слой насадки по наклонной поверхности конуса скатывается вниз. Насадка совершает в центре аппарата восходящее фонтанирующее движение, а у стенок – нисходящее [10 с.7].

Аппараты ФН в зависимости от применяемой тарелки подразделяются на следующие: с зигзагообразными тарелками и с коническими тарелками.

В аппаратах ФН с зигзагообразными тарелками фонтанирование насадки происходит в центральной части каждого зигзага. Для предотвращения скопления насадки во впадинах зигзагов перфорированная часть тарелки может выполняться в виде дырчатой или щелевой горизонтальной пластины.

В других конструкциях аппаратов ФН тарелки выполнены в виде усеченных наклонных конусов, причем проходное сечение верхней тарелки расположено под большой образующей конуса. Основная часть фонтанирующей насадки возвращается в этих аппаратах по большей образующей в отличие от аппаратов ФН с зигзагообразными тарелками [3 с.34].

Для обеспечения стабильности работы в широком диапазоне скорости газа, улучшения распределения жидкости и уменьшения уноса брызг предложены скрубберы с подвижной шаровой насадкой конической формы (КСШ) [12]. Разработано два варианта таких аппаратов: форсуночный и эжекционный.

В аппаратах рекомендуется применять полиэтиленовые шары диаметром 34-40 мм насыпной плотностью 110-120 кг/м³. Статическая высота слоя шаров составляет 650 мм. Скорость газов на входе в слой колеблется в пределах 6-10 м/с и уменьшается на выходе до 1-2 м/с. Высота конической части в обоих вариантах принята 1 м угол раскрытия конической части зависит от производительности аппаратов и может составлять от 10 до 60°.

Для улавливания брызг в цилиндрической части аппаратов размещается неорошаемый слой шаров высотой 150 мм.

В форсуночный скруббер орошающая жидкость подается в количестве 4-6 л/м³ газов.

В эжекционном варианте орошение шаров осуществляется жидкостью, которая всасывается из сосуда с постоянным уровнем газами, подлежащими очистке.

Зазор между нижним основанием конуса и уровнем жидкости зависит от производительности аппарата. Гидравлическое сопротивление форсуночного варианта составляет от 900 до 1400 Па, а эжекционного от 800 до 1400 Па.

В настоящее время применяются конические скрубберы с подвижной насадкой производительностью по газом от 3000 до 40 000 м³/ч.

В аппаратах с циркулирующей насадкой и круговым движением насадки циркулирующее или круговое движение заложено в принцип работы и осуществляется организованно с помощью дополнительных трактов (зон), специальных способов и приспособлений. Циркуляция насадок в этих аппаратах отличается от движения насадки по циркуляционному контуру, который реализуется в аппарате ФН [10 с.8].

В рабочей зоне аппаратов с циркулирующей насадкой происходит восходящее движение насадки, а возврат насадки на решетку осуществляется через транспортные тракты (каналы) и зоны.

Аппараты ЦН могут быть выполнены с внутренними (в корпусе аппарата) и наружными циркуляционными (транспортными) трактами [3 с.35].

Противоточные аппараты ПН всех типов могут эксплуатироваться без каплеуловителя при скоростях газа 4,0-4,5 м/с, а с каплеуловителем до 7-8 м/с. При правильном выборе плотности элементов насадки в аппаратах ВН и ФН и соответствующих ей режимных параметров установка удерживающей сетки верхней ограничительной решетки не обязательна. Прямоточные аппараты ПН конструктивно отличаются от противоточных тем, что оросители жидкости устанавливаются под опорно-распределительной тарелкой.

В аппаратах ПН применяются разнообразные насадочные тела, форма которых в большей мере определяет структуру газожидкостных потоков в рабочей зоне. Основными требованиями к ним являются обеспечение интенсивной турбулизации потоков и широкого диапазона устойчивой работы аппарата, однородности структуры слоя с целью предотвращения проскока газа и жидкости, а также высокая прочность и низкая стоимость. Кроме того, они должны иметь низкое гидравлическое сопротивление и не забиваться твердыми примесями. Материал насадки выбирается из условия химической и температурной стойкости в обрабатываемой среде.

Форма насадки должна обеспечивать равномерность взвешивания и наибольший диапазон устойчивой работы. В качестве насадок ВН, ФН и ЦН наиболее предпочтительны сферические тела.

С целью увеличения поверхности полые сферические тела (шары) выполняются со сквозными отверстиями, снабжаются лопастями каплевидной или тороидальной формы, а сплошная шаровая насадка - в виде соединенных упругой приставкой половинок, со сквозными каналами, минообразной формы, а также с рисками и гофрами на поверхности, шипами и иглами [10 с.23]. На практике используют также кольцевые насадки с гладкой и перфорированной поверхностью, кубики, конусы, торы, пирамиды. К разновидностям кольцевых насадок относятся насадочные тела в виде полуколец, сплошных труб и цилиндров с турбулизаторами различной формы. Получили распространение

также сложные конструкции элементов насадки, выполненные в виде взаимно-пересекающихся дисков, полос, шипов, колец, пропеллеров и двойной спирали. Имеются полые и перфорированные насадочные тела больших размеров, внутри которых помещены тела небольшого размера.

Аппараты с подвижной насадкой нашли широкое применение в процессах абсорбции и пылеулавливания. Они имеют удельную производительность в 2-3 раза выше, чем тарельчатые и насадочные колонны, механические абсорберы, и более низкое (2,5-3 раза) гидравлическое сопротивление, чем скрубберы Вентури с регулируемой горловиной [10 с.21].

Методики расчета аппаратов с подвижной насадкой включают расчет гидравлических характеристик, массообмена и пылеулавливания [13].

К гидравлическим характеристикам колонных массообменных аппаратов относятся гидравлическое сопротивление, динамическая высота и газосодержание газожидкостного слоя, количество удерживаемой жидкости на решетке h_0 , динамической уровень жидкости h_d и другие [10 с.24].

Количество удерживаемой жидкости, отнесенное к площади сечения аппарата h_0 и динамический уровень жидкости h_d .

Для аппарата ВН:

$$Fr = \frac{\rho_r \cdot W_r^2}{\rho_{ж} g h_{ж}} = x \left(\frac{W_r}{W_{жк}} \right)^z \cdot \left(\frac{H_{ст}}{d_H} \right)^{-0,25} \left(\frac{\rho_H}{\rho_{жк}} \right)^{0,1} \cdot S_0^{0,2} \quad (1.1)$$

при $W_r \leq 3,0 \frac{м}{с}$, $x = 0,0075$, $z = 0,33$; при $W_r > 3,0 \text{ м/с}$, $x = 0,017$, $z = 0,29$

Для аппарата ФН:

$$Fr = x \left(\frac{W_r}{W_{жк}} \right)^z \cdot \left(\frac{H_{ст}}{d_H} \right)^{-0,25} \left(\frac{\rho_H}{\rho_{жк}} \right)^{0,1} \cdot \left(tg \frac{\alpha}{2} \right)^{0,15} \cdot S_0^{0,25} \quad (1.2)$$

при $W_r \leq 3,0 \text{ м/с}$, $x = 0,007$, $z = 0,33$; при $W_r > 3,0 \text{ м/с}$, $x = 0,017$, $z = 0,43$

Динамическая высота газожидкостного слоя H_d

Для аппаратов ВН, ВНС и ФН

$$H_d = \left[H_{ст}(1 - \varepsilon_0) + h_0 \left\{ \frac{1}{K} \sqrt{\frac{\rho_r W_r^2}{\rho_{жк} g h_{жк} + (1 - \varepsilon_0) \rho_H g H_{ст}}} + 1 \right\} \right] \quad (1.3)$$

для ВН: $K = 0,043$; для ВНС: $K = 0,08$; для ФН: $K = 0,065$

Газосодержание газожидкостного слоя φ .

Для аппаратов ВН, ВНС и ФН:

$$\varphi = \frac{W_r}{K \sqrt{\frac{g}{\rho_r} [\rho_{жк} h_{жк} + (1 - \varepsilon_0) \rho_H H_{ст}] + W_r^2}} \quad (1.4)$$

для ВН: $K = 0,043$; для ВНС: $K = 0,08$; для ФН: $K = 0,065$

Гидравлическое сопротивление ΔP (для аппаратов ВН, ВНС и ФН):

$$\Delta P = \Delta P_{c,p} + \Delta P_{c,n} + \Delta P_{гж} \quad (1.5)$$

Здесь гидравлическое сопротивление сухой решетки:

$$\Delta P_{c,p} = \zeta_{c,p} \frac{\rho_r \cdot W_r^2}{2 \cdot S_0^2} \quad (1.6)$$

для ВН $\zeta_{c,p} = 1,5$; ВНС $\zeta_{c,p} = 1,5$; ФН $\zeta_{c,p} = 1,9$.

Гидравлическое сопротивление сухой насадки для ВН, ВНС и ФН:

$$\Delta P_{c,n} = (1 - \varepsilon_0) \rho_n g H_{ст} \quad (1.7)$$

Гидравлическое сопротивление газожидкостного слоя для аппаратов ВН, ВНС, ФН и РПН:

$$\Delta P_{гж} = \left[\varepsilon - \varphi - 4 \left(\frac{d_n}{D_a} \right)^2 \cdot \frac{\delta_n}{H_\partial} \cdot n_\varepsilon \right] \rho_{ж} g H_\partial \quad (1.8)$$

Здесь

$$\delta_n = 0,8 \frac{v_{ж}^{1/3} U_{ж}^{1/3} d_n^{1/3}}{g^{1/3}} \quad (1.9)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{(1 - \varepsilon_0) H_{ст}}{H_\partial} \quad (1.10)$$

для ВН, ВНС, и ФН:

$$n_\varepsilon = \frac{3(1 - \varepsilon_0) H_{ст} D_a^2}{2 d_n^3} \quad (1.11)$$

В монографии [14 с.92] рассмотрены различные конструкции газопромывателей и методики их расчета. В корпусе газопромывателя с подвижной шаровой насадкой между нижней опорно распределительной тарелкой и верхней ограничительной тарелкой помещается слой шаров из полимерных материалов, стекла или пористой резины [15] В качестве насадок возможно использование тел и другой формы, например колец [16]. Для обеспечения свободного перемещения насадки в газожидкостной смеси плотность шаров $\rho_{ш}$ не должна превышать плотности жидкости ($\rho_{ш} \leq \rho_{ж}$).

Оптимальным гидродинамическим режимом работы газопромывателя при пылеулавливании считается режим полного (развитого) псевдооживления [17]. Скорость газов W'_r м/с, рассчитанная по площади полного сечения аппарата, соответствующая началу режима полного псевдооживления, опеределяется из выражения:

$$\frac{(W'_r)^2}{d_{ш}} = c S_0 \exp \left[-12,6 \left(\frac{Q_{ж}}{Q_r} \right)^{0,25} \right] \quad (1.12)$$

где $d_{ш}$ -диаметр шаровой насадки, м; c – коэффициент (при ширине щели в опорной тарелке $b = 2$ мм $c = 2,8 \cdot 10^4$, при $b > 2$ мм $c = 4,5 \cdot 10^4$).

Предельно допустимая скорость газов $W''_г$, также рассчитанная по площади полного сечения аппарата, не зависит от ширины щели и определяется по эмпирической формуле

$$W''_г = 2,9 S_0^{0,4} \left(\frac{Q_{ж}}{Q_г} \right)^{-0,15} \quad (1.13)$$

Скорость газов рекомендуется [16] принимать в пределах 5-6 м/с, а удельное орошение 0,5-0,7 л/м³. Свободное сечение опорной тарелки S_0 принимается равным 0,4 м²/м² при ширине щелей 4-6 мм. При очистке газов, содержащих смолистые вещества, а также пыль, склонную к образованию отложений, применяются щелевые тарелки с большей долей свободного сечения (0,5-0,6 м²/м²). Свободное сечение ограничительной тарелки составляет 0,8-0,9 м²/м².

При выборе диаметра шаров необходимо соблюдать соотношение $D/d_{ш} \geq 10$. Оптимальными являются шары диаметром 20-40 мм и насыпной плотностью 200-300 кг/м³ [18].

Минимальная статическая высота слоя насадки $H_{ст}$ составляет 5-8 диаметров шаров, а максимальная определяется из соотношения $H_{ст}/D \leq 1$.

Высота секции (расстояние между тарелками) $H_{секц}$ определяется из выражения:

$$H_{секц} = H_{дин} + H_{сеп}, \quad (1.14)$$

где $H_{дин}$ - динамическая высота слоя псевдооживленной шаровой насадки, м; $H_{сеп}$ - высота сепарационной зоны, м.

Динамическая высота $H_{дин}$ может быть определена по уравнению [19]:

$$H_{дин} = 0,118 W_{ж}^{0,3} H_{ст}^{0,6} \left(\frac{\omega_г}{S_0} \right)^{0,93}, \quad (1.15)$$

а высота сепарационной зоны $H_{сеп}$ может быть принята равной (0,1-0,2) $H_{дин}$.

Общее гидравлическое сопротивление аппарата рассчитывается по уравнению:

$$\Delta p = \Delta p_{вх} + \Delta p_{вых} + \Delta p_т + \Delta p_{ш} + \Delta p_{ж,н} + \Delta p'_т \quad (1.16)$$

где $\Delta p_т$ – гидравлическое сопротивление опорной тарелки со слоем удерживаемой ею жидкости, Па; $\Delta p_{ш}$ - гидравлическое сопротивление слоя сухой насадки, Па; $\Delta p_{ж,н}$ - гидравлическое сопротивление слоя жидкости, удерживаемого слоем насадки, Па; $\Delta p'_т$ - гидравлическое сопротивление ограничительной тарелки, Па.

По формуле для провальных тарелок с большим свободным сечением может быть определена Δp_T , также определяется и $\Delta p'_T$, если ороситель установлен выше тарелки. Если же ороситель расположен ниже тарелки, то $\Delta p'_T$ не превышает 20-25 Па.

Находят $\Delta p_{ш}$ из выражения:

$$\Delta p_{ш} = \rho_{ш} H_{ст} (1 - \varepsilon_0), \quad (1.17)$$

где $\rho_{ш}$ - насыпная плотность шаров, кг/м³; ε_0 - порозность неподвижного слоя сухой шаровой насадки, принимается равной 0,4.

Определяют $\Delta p_{ж,н}$ по формуле [20]:

$$\Delta p_{ж,н} = 1254 \omega_{г}^{0,24} \omega_{ж}^{0,17} H_{ст}^{0,92} \rho_{ш}^{-0,1}, \quad (1.18)$$

где $\omega_{ж}$ - скорость орошающей жидкости в расчете на свободное сечение аппарата, м/с.

Для расчета эффективности массообмена в жидкой фазе в аппаратах ПН в работе [10 с.27] рассмотрены гидродинамические режимы движения капель и пленок. Отмечено, что закономерности массоотдачи в капле и пленке жидкости различны.

Уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в капле имеет следующий вид

$$\beta_{ж}^k = K_k \frac{\rho_r^{0,35} \cdot U^{0,23} \cdot D_M^{0,50}}{\rho_{ж}^{0,25} \cdot v_{ж}^{0,13} \cdot d_k^{0,26} \cdot \sigma^{0,10}} \quad (1.19)$$

или в виде соотношений безразмерных критериев.

$$Sh_{ж}^k = K_k Re_k^{0,63} \cdot We^{0,10} \cdot K_p^{0,25} \cdot Sc^{0,50} \quad (1.20)$$

Средний размер капель в слое определяется по уравнению:

$$d_k = 9,7 \frac{\sigma^{0,6} \cdot \delta_H^{0,4}}{\rho_{ж}^{0,2} \rho_r^{0,4} U_r^{1,2}} \quad (1.21)$$

Для расчета $\beta_{ж}^k$ с учетом диаметра капель можно воспользоваться следующим уравнением:

$$\beta_{ж}^k = K_k \frac{\sigma^{0,6} \cdot \delta_H^{0,4}}{v_{ж}^{0,12} \cdot \rho_{ж}^{0,20} \cdot \sigma^{0,30} \cdot d_H^{0,08}} \quad (1.22)$$

или

$$Sh_{ж}^k = K_k Re_k^{0,62} \cdot We^{0,30} \cdot K_p^{0,20} \cdot Sc^{0,50} \quad (1.23)$$

Коэффициент массоотдачи в пленке определяется следующим уравнением:

$$\beta_{\text{ж}}^{\text{пл}} = K_{\text{пл}} \frac{U_{\text{ж}}^{2/3} \cdot g^{1/2} \cdot D_{\text{м}}^{1/2}}{v_{\text{ж}}^{1/2} \cdot d_{\text{н}}^{1/12}} \quad (1.24)$$

или

$$Sh_{\text{ж}}^{\text{пл}} = K_{\text{пл}} Re_{\text{ж}}^{2/3} \cdot Ga^{1/12} \cdot Sc^{1/2} \quad (1.25)$$

Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе определяется суммированием частных коэффициентов массоотдачи в капле и пленке:

$$\beta_{\text{ж}} = \beta_{\text{ж}}^{\text{к}} + \beta_{\text{ж}}^{\text{пл}} = K_{\text{к}} \frac{\rho_r^{0,6} \cdot U^{\frac{1}{2}} \cdot D^{0,5}}{v_{\text{ж}}^{0,12} \cdot \rho_{\text{ж}}^{0,20} \cdot \sigma^{0,30} \cdot d_{\text{н}}^{0,08}} + K_{\text{пл}} \frac{U_{\text{ж}}^{\frac{2}{3}} \cdot g^{0,08} \cdot D_{\text{м}}^{0,5}}{v_{\text{ж}}^{0,5} \cdot d_{\text{н}}^{0,08}} \quad (1.26)$$

Коэффициенты пропорциональности $K_{\text{к}}$ и $K_{\text{пл}}$ для уравнения (1.26) приведены в [10 с.28] в виде таблицы.

Для расчета коэффициента массоотдачи в газовой фазе в аппарате ВН в случаях абсорбции фторсодержащих газов различными поглотителями предлагается следующее общее уравнение [10 с.28]:

$$\beta_{rs} = A \cdot W_r^{1,1} \cdot L^{0,13} \cdot H_{\text{ст}}^{0,43} \cdot d_{\text{н}}^{-0,3} \cdot \rho_{\text{н}} \cdot e^{1,8S_0} \quad (1.27)$$

в котором постоянная A для каждой системы газа и поглотителя определяется из таблицы [10 с.29].

Для системы $\text{SO}_2 - 5\% \text{Na}_2\text{CO}_3$ коэффициент массоотдачи в газовой фазе для аппарата ВН:

$$\beta_{rs} = 1,05 \cdot W_r^{1,2} \cdot L^{0,1} \cdot H_{\text{ст}}^{0,3} \cdot d_{\text{н}}^{-0,1} \cdot \rho_{\text{н}}^{0,2} \cdot e^{1,8S_0} \quad (1.28)$$

Для систем: $\text{HF} - \text{H}_2\text{O}; \text{HF} - 5\% \text{Na}_2\text{CO}_3; \text{HF} - 1,5\% \text{Ca}(\text{OH})_2; \text{HF} - 9\% \text{H}_2\text{SiF}_6$ коэффициент массоотдачи в газовой фазе для аппарата ФН:

$$\beta_{rs} = 0,7 \cdot W_r^{1,0} \cdot L^{0,1} \cdot H_{\text{ст}}^{0,3} \cdot d_{\text{н}}^{-0,1} \cdot \rho_{\text{н}}^{0,15} \cdot \left(\text{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \cdot e^{2S_0} \quad (1.29)$$

Эффективность или степень абсорбции определяется по уравнению [10 с.29]:

$$\beta_{rs} = W_{\Gamma} \ln \frac{C_{\text{н}}}{C_{\text{к}}} \quad (1.30)$$

Для этого определяется конечная концентрация $C_{\text{к}}$ при известной концентрации $C_{\text{н}}$ абсорбируемого газа.

Эффективность или степень абсорбции равна:

$$\eta_a = \frac{C_H - C_K}{C_H} \cdot 100\% \quad (1.31)$$

Общая степень пылеулавливания рассчитывается по формуле [10 с.30]:

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{\eta_{\text{фр}1}\phi_1 + \eta_{\text{фр}2}\phi_2 + \dots + \eta_{\text{фр}n}\phi_n}{100}, \quad (1.32)$$

где $\eta_{\text{фр}i}$ – эффективность улавливания отдельной фракций, %; ϕ_i – содержание частиц данной фракции в пыли, поступающей в аппарат, % (масс.).

Величины $\eta_{\text{фр}i}$ определяются по следующему уравнению [3]:

$$\eta_{\text{фр}i} = 1 - K_D \exp((-K_\alpha \cdot Sc)^{-1/4}), \quad (1.33)$$

где $K_\alpha = 1,7$; $K_D = 1,65$ – для аппарата ВН, ФН; $Sc = v_\Gamma/D_\Gamma$ – критерий Шмидта.

Расчет коэффициента турбулентной диффузии для частиц D_Γ проводится по уравнениям [3 с.53]:

аппарат ВН, ФН:

$$D_\Gamma = 0,56 \left(\frac{H_{\text{ст}}}{d_H}\right)^{1/3} \left(\frac{\rho_\Gamma}{\rho_{\text{ж}}}\right)^{1/3} \left(\frac{1}{h_0}\right)^{1/3} d_k^{4/3} U_\Gamma Stk, \quad (1.34)$$

где $Stk = d_\Gamma^2 \rho_\Gamma U_\Gamma / 18 \mu_\Gamma d_k$ – критерий Стокса.

Для упрощения расчетов скорость движения частиц принимается равной истинной скорости газа в слое $U_u = U_\Gamma$.

В работе [21 с.145] отмечается, что закономерности процесса пылеулавливания в аппаратах ПН практически мало изучены, хотя во многих работах особо подчеркивается перспективность применения этих аппаратов для процессов мокрого обеспыливания газов, сопровождающихся образованием взвесей и осадков. При этом авторы полагают, что механизм пылеулавливания носит турбулентно-инерционный характер. Эффективность процесса зависит от многих факторов, из которых основными являются физико-химические свойства пыли и гидродинамический режим работы аппарата.

Степень улавливания пыли с повышением скорости газа до 4,5-5,0 м/с возрастает во всех аппаратах ПН [21 с.146]. В пылеуловителях ВН, и ИТПН, где используется противоток, дальнейшее увеличение скорости газа приводит к снижению степени пылеулавливания, так как при этом значительно возрастает брызгоунос. В аппарате ВН, имеющим узел сепарации брызг, степень очистки увеличивается непрерывно во всем диапазоне изменения скорости газа. Таким образом, проточное взаимодействие фаз способствует повышению эффективности при одновременном увеличении производительности пылеуловителя.

Закономерность увеличения степени осаждения с возрастанием скорости газа наблюдается для пыли любых фракции. Естественно, что абсолютное значение коэффициента пылеулавливания крупных частиц больше, чем мелких, но степень улавливания последних с повышением w_r увеличивается значительно.

Рост удельного расхода промывной жидкости m_y в 3 раза (от 0,5 до 1,5 л/м³) приводит к увеличению степени пылеулавливания частиц размером 5,7 мкм всего на 0,5%. Степень улавливания частиц размером 5,7 мкм с ростом удельного расхода жидкости изменяется более значительно, что связано с непрерывным увеличением поверхности осаждения [21 с.146].

Для аппаратов ВН рекомендуемое значение $m_y \approx 0,5-0,9$ л/м³. Влияние конструктивных параметров аппаратов ПН на степень пылеулавливания аналогично их влиянию на процессы массопереноса.

Существуют различные подходы к расчету степени пылеулавливания в аппаратах ПН. По аналогии с процессами переноса молекул вещества и частиц аэрозоля можно оценить интенсивность осаждения с помощью коэффициента скорости пылеулавливания $K_{п}$. Получено выражение, позволяющее определить степень очистки [22]:

$$\eta = 1 - \exp(-K_{п} \cdot H_{ст}/3600 \cdot U_r) \quad (1.35)$$

Путем математической обработки экспериментальных данных по фракционной эффективности получены уравнения для расчета $K_{п}$:

$$K_{п} = K_1 \cdot \text{Stk}^a \cdot \text{Re}_r^b, \quad (1.36)$$

$$K_{п} = K_1 \cdot \omega_r^c \cdot L_0^d, \quad (1.37)$$

где K_1, K_2, a, b, c, d - коэффициенты пропорциональности, зависящие от природы пыли и конструктивных особенностей аппарата.

По уравнению (1.36) определяют коэффициент скорости улавливания крупных частиц. т.е. предполагается преобладание инерционных сил взаимодействия, а по уравнению (1.37) – эффективность осаждения мелких частиц с преобладанием турбулентной диффузии.

Полученные расчетные зависимости обладают рядом существенных недостатков. Во-первых, инерционное осаждение частиц рассматривается только при обтекании газовым потоком элементов насадки без учета внутренней структуры трехфазного слоя, что не отражает сущности реального процесса. Во-вторых, при расчете коэффициента пылеулавливания на основе механизма турбулентной диффузии совершенно не учитывается сам коэффициент диффузии, а также влияние турбулентных пульсаций на поведение и степень увлечения частиц. В-третьих, значения коэффициентов K_1 и K_2 необходимо определять в каждом конкретном случае, поскольку они

изменяются в широких пределах. Например, по данным авторов, для кварцевой пыли $K_1 = 8,9$, а для пыли электролизеров $K_1 = 0,76 \cdot 10^{-3}$.

В работе [23] принято, что механизмы пылеулавливания в аппаратах с подвижной насадкой и в пенных аппаратах аналогичны. На основании этого расчет эффективности пылеулавливания предлагают проводить путем корректировки фракционных степеней очистки, полученных для пенных аппаратов из соотношения:

$$\eta = \eta_0 (H_d/0,09)^{0,075}, \quad (1.38)$$

где η_0 - эффективность пылеулавливания, рассчитанная на основании кривых фракционных степеней очистки для пенных аппаратов.

Другой подход к расчету аппаратов ПН основан [24] на энергетической теории мокрого пылеулавливания, согласно которой эффективность аппаратов мокрой очистки определяется главным образом затратами энергии на проведение процесса по уравнению [17]:

$$\eta = 1 - e^{B \cdot K_v^\chi}, \quad (1.39)$$

где K_v - удельная энергия соприкосновения, кДж на 1000 м^3 газов; B и χ - константы, определяемые дисперсным составом пыли.

Обобщая результаты работ, можно отметить, что, несмотря на утверждение о преобладании турбулентно-инерционного механизма осаждения в аппаратах ПН, исследователи не раскрывают достаточно полно реальные условия процесса, не учитывают структуру слоя и характер взаимодействующих фаз.

Разработаны [25] модели инерционного и диффузионного осаждения частиц на поверхности капель и пленок в слое подвижной насадки и на основе турбулентно-инерционного механизма пылеулавливания предложено уравнение для определения степени пылеулавливания

$$\eta = 1 - B_1 \exp(-1,7Sc)^{-0,25} \quad (1.40)$$

где, $Sc = \nu_r/D_r$ - число Шмидта; B_1 - коэффициент для аппаратов ВН, ИТПН и ЦН, равный 1,65, 2,45 и 2,60 соответственно.

Коэффициент турбулентной диффузии, полученный с учетом влияния инерционного механизма (в момент выброса частицы из турбулентного потока к поверхности осаждения), равен:

$$D_r = B_2(K_p \cdot d_k^4/h_o)^{1/3} \cdot U_r \cdot Stk, \quad (1.41)$$

где $K_p = \rho_r/\rho_{ж}$; h_o - для ИТПН и ЦН равен Δh ; $U_r = \omega_{пат}$; B_2 - коэффициент пылеуловителей ЦН и ИТПН равен 1,37 и 1,14, а для РПН и ВН

$B_2=0,56(d_H/t_T)^{2/3} \cdot (H/t_B)^{1/3}$ и $B_2=0,56(H_{ст}/d_H)^{1/3}$, соответственно; H - высота РПН; d_k – диаметр капли.

Предложенное выше уравнение учитывает влияние всех режимных и конструктивных параметров аппаратов ПН и дисперсный состав пыли и позволяет рассчитать фракционную эффективность пылеуловителей ВН, ИТПН и ЦН с достаточной точностью.

Кроме этого, на основе аналогии процессов, протекающих в пенных аппаратах и аппаратах с псевдооживленным слоем шаровой насадки, эффективность пылеулавливания в последних может быть определена по формуле [14 с.50] с помощью значений d_{50} и $\lg \alpha_\eta$, полученных для пенных аппаратов:

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dx = \Phi(x) \quad (1.42)$$

Здесь $x = \frac{\lg d_m/d_{50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_\eta}}$, а d_m , $\lg \sigma_\eta$, d_{50} и $\lg \sigma_\eta$ – параметры, полностью характеризующие дисперсный состав частиц и зависимость $\eta_\Pi = f(d_\Pi)$ для данного аппарата. Значения функции $\Phi(x)$ приведены в таблице [14 с.50]. Полученные по формуле (1.42) значения могут быть скорректированы по выражению (1.38), в котором η_0 – эффективность пенного аппарата.

1.2 Анализ работы аппаратов с регулярной подвижной насадкой и их расчет

Создание аппаратов с регулярным расположением насадочных элементов в объеме рабочей зоны аппарата явилось альтернативой аппаратам со взвешенной насадкой, в которых для создания однородного трехфазного слоя требовалась затрата дополнительной энергии газового потока. При этом, на начальном этапе, роль шагов расположения элементов насадки в вертикальном и радиальном направлениях не была в достаточной степени изучена. Повышенный интерес к аппаратам данной конструкции объясняется тем, что регулярное размещение насадочных элементов с использованием принципа продольно-поперечного секционирования позволяет в достаточно полной мере использовать энергию газового потока для создания вихревой структуры слоя и при этом иметь малое гидравлическое сопротивление [3 с.39], [26 с.8].

Регулярное и равномерное расположение элементов подвижной насадки в аппаратах РПН является одним из необходимых условий достижения однородности структуры газожидкостного слоя и равномерного распределения потоков газа и жидкости. Отличительной особенностью аппаратов с РПН является также возможность достижения в них режима одновременного вихреобразования (синфазного режима), зависящего от геометрической формы насадочных тел и шагов расположения элементов в вертикальном направлении [3 с.56].

Известны две разновидности аппаратов РПН: аппараты со свободно

насаженными на жестких струнах насадочными телами и аппарата с гибкими струнами с жестко закрепленными насадочными телами [3 с.39].

В аппарате первой разновидности струны натянуты между стенками корпуса или между решетками, движение насадок происходит только по струне, пробег каждого элемента насадки по струне ограничен. В зависимости от пространственного закрепления струн, насадка может двигаться только в вертикальном или горизонтальном направлении.

Гибкие струны с жестко закрепленной насадкой консольно крепятся к стенке аппарата или к решетке. Наиболее распространена конструкция насадки, в которой один конец струны с насадкой свободно пропускается через отверстие распределительной решетки, а другой конец фиксируется сверху к крепежной решетке. Упругость и гибкость струн позволяет элементам насадки совершать под действием пульсаций потоков поперечные и продольные колебательные движения.

К аппаратам с жестко закрепленными насадочными телами можно отнести аппарат с трубчатым пучком регулярной структуры [27,28].

Насадочные элементы в аппаратах с РПН имеют форму шаров, кубиков, цилиндров, пластин и т.д. [29-32]. На поверхности или внутри насадочных тел могут быть выполнены дополнительные элементы. Так, например, в цилиндрических насадочных элементах имеются полости для перераспределения жидкости [33], а на шаровых насадках располагаются иглы, предназначенные для диспергирования пленок жидкости на капли [34]. Пластинчатые насадки изготавливаются с перфорированной поверхностью, кромки снабжаются козырьками и язычками.

По характеру формируемых вихрей насадочные тела могут быть сгруппированы на тела с симметричными (тороидальными) вихрями, имеющие период образования и несимметричными вихрями, имеющие полупериод и период образования вихрей. К телам первой группы относятся хорошо обтекаемые элементы шары, конусы, тела каплевидной формы. Ко второй группе относятся плохо обтекаемые призматические тела с круглой, квадратной, треугольной, х-образной и т.д. формой поперечного сечения [3].

В зависимости от основных форм воздействия на характер движения газожидкостных потоков в [35] предложено классифицировать аппараты с РПН по создаваемой в них вихревой структуре: вихревое движение, создаваемое при обтекании насадочных тел, регулярно размещенных в объеме контактной зоны [30,31,36]; вихревое движение, осложненное вибрацией пластинчатых [37,38] и пластинчатых спиральных [39] элементов; вихревое движение, осложненное вращением насадочных элементов [40-42] и локальной закруткой потока в зоне формирования вихрей [43].

Формируемая вихревая структура газожидкостных потоков в аппаратах с РПН, приводит к созданию высокоразвитой межфазной поверхности, а это в свою очередь способствует значительной интенсификации процессов теплообмена [44 с.27].

Кроме того, выполнение контактного устройства в виде пучка труб, расположенных поперек движению газожидкостного потока, дает дополнительные преимущества, так как в этом случае возможен подвод тепла непосредственно в зону контакта фаз или отвод из нее, что является обязательным условием эффективного проведения многих тепломассообменных процессов и хемосорбции [44 с.27], [45].

В работах [46,47] приведены результаты исследований гидродинамических закономерностей аппарата с регулярной подвижной насадкой, в котором элементы насадки жестко насажены на струны, закрепленные сверху к крепежной решетке, а нижние концы струн свободно пропускались через отверстия опорно-распределительной решетки. В качестве насадки использованы шары из пористой резины диаметром 40мм и плотностью 650кг/м³. Струны изготовлены из гибкой проволоки и размещены по вершинам равностороннего треугольника на расстоянии друг от друга 100мм. Расстояние между элементами насадки на струне по вертикали 120мм, причем на соседних струнах элементы насадки смещены относительно друг друга на половину шага. По результатам исследований выявлены следующие режимы работы аппарата РПН: пленочной, переходной, развитой турбулентности и интенсивного брызгоуноса. Для расчета гидродинамических и структурных характеристик аппарата с регулярной насадкой предложены методики расчета. В частности, гидравлическое сопротивление определяется по зависимости:

$$\Delta P = \xi_{c.p.} \frac{\rho_z W_z^2}{2S_0^2} + 2\xi_{cm} \left(\frac{W_z}{\varphi} \right)^2 \frac{H_\delta}{D_a} + \Delta P_{c.n.} + \left[\varepsilon_0 - \varphi - 4 \left(\frac{d_n}{D_a} \right)^2 n_\varepsilon \frac{h_{nl}}{H_\delta} \right] \rho_{жс} \cdot g H_\delta, \quad (1.43)$$

в которой

$$\Delta P_{c.n.} = 2\xi_n \frac{\rho_z W_z^2 (1 - \varepsilon_0)}{d_n \varepsilon_n^2}. \quad (1.44)$$

Количество удерживаемой жидкости рассчитывается по формуле:

$$F_z = 0,019 \left(\frac{W_z}{W_{жс}} \right)^{0,17} S_0^{0,25}, \quad (1.45)$$

Для расчета высоты газожидкостного слоя дано выражение:

$$H_\delta = \frac{h_0}{\varepsilon_0} \left[1 + \frac{K(1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0} \right] F_z + 2 \sqrt{\frac{K}{\varepsilon_0} F_z}, \quad (1.46)$$

а для расчета газосодержания:

$$\varphi = \frac{2}{\sqrt{\frac{1}{K\varepsilon_0 F_z} \left[1 + \frac{2K(1-\varepsilon_0)}{\varepsilon_0} F_z + 2\sqrt{\frac{K}{\varepsilon_0} F_z} \right] + 1 + 1}}. \quad (1.47)$$

Коэффициент продольного перемешивания жидкой фазы вычисляется по формуле:

$$E_{жс} = K_{np} \frac{(\varepsilon_0 - \varphi)^{2/3}}{\varphi} \left(\frac{\rho_z}{\rho_{жс}} \right)^{1/3} \left(\frac{d_n}{t_g t_r^2} \right)^{1/3} \left(\frac{H_\delta D_a}{H_\delta + D_a} \right)^{1/3} H_\delta W_z. \quad (1.48)$$

Для аппаратов с регулярной подвижной пластинчатой насадкой [48] проведены исследования гидродинамических закономерностей и получены расчетные зависимости гидравлического сопротивления:

$$\Delta P = \Delta P_c (1 + f), \quad (1.49)$$

где:

$$\Delta P_c = \xi \theta_g \frac{\rho_z W_z^2}{2\varepsilon_0^2} \cdot \frac{H}{t_g}, \quad (1.50)$$

здесь $\xi = 1,1$ коэффициент сопротивления прямоугольной плоской пластины;

θ_g - параметр, учитывающий влияние расположения элементов насадки на струне определяемый по формуле:

$$\theta_g = \frac{2\theta \cdot t_g}{4\theta^2 - 2\theta \cdot t_g + t_g}. \quad (1.51)$$

Для эжекционного и форсуночного варианта аппарата РПН [49] получены уравнения для расчета гидравлического сопротивления:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_{жс}, \quad (1.52)$$

для эжекционного варианта

$$\Delta P_c = \left(\xi_n + \frac{\xi_n}{\varepsilon_n^2 \cdot \Gamma^2} \cdot \frac{H_n}{t_g} \right) \cdot \frac{\rho_z W_{zn}^2}{2}, \quad (1.53)$$

для форсуночного варианта

$$\Delta P_c = \left(\xi_p \frac{1}{S_0^2} + \frac{S_n}{\varepsilon_n^2} \cdot \frac{H_n}{t_g} \right) \cdot \frac{\rho_z W_z^2}{2} \quad (1.54)$$

Здесь ξ_n, ξ_p, ξ_h - коэффициенты сопротивления газовых патрубков, решеток и насадки, соответственно.

Для коэффициента сопротивления насадки дано выражение:

$$\xi_n = 0,26 \cdot \theta_\theta \cdot \theta_z \cdot \exp\left(0,121 \frac{t_\theta}{\theta}\right), \quad (1.55)$$

где θ_θ, θ_z - коэффициенты характеризующие степень взаимодействия вихрей в вертикальном и горизонтальном направлениях, соответственно.

Сопротивление газожидкостного слоя для эжекционного аппарата уравнение (1.52) определяется по формуле:

$$\Delta P_{жс} = \lambda \frac{\rho_z W_{zn}^2}{2} + \rho_{жс} g [(1 - \varphi_s) \cdot \Delta h + h_{нл}]. \quad (1.56)$$

В работах [44 с.96],[50,51,29] для аппаратов с регулярной подвижной насадкой различной геометрической формы принят единый подход для определения гидравлического сопротивления:

$$\Delta P = \xi \frac{H}{t_\theta} \cdot \frac{\rho_z W_z^2}{2 \varepsilon_0^2}, \quad (1.57)$$

где $\xi_L = K \cdot \theta_{\theta L} \cdot \theta_{pL} (t_\theta / \theta)^{0,65} \exp(-0,177 \cdot t_\theta / \theta)$ - коэффициент сопротивления для пластинчатой насадки при больших плотностях орошения [29];

$\xi_L = 0,1 \cdot \theta_\theta \cdot \theta_p \cdot \text{Re}_{жс}^{0,2}$ - коэффициент сопротивления для пластинчатой насадки при плотностях орошения до $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ [50];

$\xi_c = 0,35 \cdot \theta_\theta \cdot \theta_p \cdot K_\varepsilon^{0,024}$ - коэффициент сопротивления для пластинчатых вибрирующих насадок [44 с.96];

$\xi_c = K_1 \cdot \theta_\theta \cdot \theta_p + \left(\frac{\text{Re}_u}{\text{Re}_z}\right)^{0,5}$ - коэффициент сопротивления для вращающихся пластин круглой и квадратной формы [44 с.97]; $K_1 = 0,1$ - для круглых и $K_1 = 0,075$ для квадратных вращающихся пластин; θ_θ и θ_p - коэффициенты для определения степени взаимодействия вихрей в вертикальном и в радиальном направлениях;

$\xi_L = 0,677 \theta_\theta \theta_p \text{Re}_{жс}^{0,1}$ коэффициент сопротивления для шаровой насадки [51];

$\xi_L = 0,25 \cdot \theta_\theta \cdot \theta_p \cdot \text{Re}_{жс}^{0,1}$ - коэффициент сопротивления для трубчатого пучка регулярной структуры [52 с.75].

Аналогичный подход к определению гидравлического сопротивления был принят при выводе уравнения для расчета гидравлического сопротивления поверхностного кожухотрубчатого теплообменника [53-55].

Для многих аппаратов с регулярной подвижной насадкой [44 с.100], [45,29] для расчета количества удерживаемой жидкости (КУЖ) принят энергетический подход, базирующийся на уравнении сохранения энергии газового потока при одномерном и установившемся движении его в элементарном объеме одной ячейки. В результате получено выражение для определения количества удерживаемой жидкости:

$$h_0 = (h_{nl} + h_k) \cdot \frac{H}{t_g} \quad (1.58)$$

Для плоских пластин [48] пленочная составляющая КУЖ рассчитывается по формуле:

$$h_{nl} = \delta_{nl} \epsilon^2 / t_g^2, \quad (1.59)$$

где δ_{nl} – толщина пленки жидкости на поверхности пластин:

$$\delta_{nl} = 0,5 \left(\frac{\epsilon \cdot U_{жс}}{\mu \sqrt{g}} \right)^{2/3} \left(\frac{\cos \alpha}{1 + \cos \alpha} \right)^{2/3} \quad (1.60)$$

Здесь $\mu=0,32$ коэффициент расхода; α - угол наклона. Капельная составляющая КУЖ имеет вид:

$$h_k = B_h \cdot \frac{\xi_L}{g \rho_{жс}} \cdot \frac{\rho_g W_g^2}{2} \cdot \frac{(2 - \epsilon_0)(1 - \epsilon_0^2)}{\epsilon_0^2} \quad (1.61)$$

Для пластинчатой вибрирующей и вращающейся насадки, а также в случае использования больших нагрузок по жидкости [29] получены аналогичные выражения.

В работе [50], исходя из аналогии:

$$h_0 = \frac{\Delta P - \Delta P_c}{g \rho_{жс}}, \quad (1.62)$$

получено выражение:

$$h_0 = \frac{\xi_L - \xi_c}{g \rho_{жс}} \cdot \frac{\rho_g W_g^2}{2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{H}{t_g}, \quad (1.63)$$

где ξ_L и ξ_c коэффициенты сопротивления орошаемого и сухого аппарата, соответственно.

Для трубчатого пучка регулярной структуры [52 с.76]:

$$h_o = 0,54 \cdot \xi_L \cdot \frac{H}{t_g} \cdot \frac{\rho_r W_r^2}{2 \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot \varepsilon_0^2} \quad (1.64)$$

Расчет газосодержания слоя во всех исследованных аппаратах с регулярной насадкой определяется по известной балансовой формуле.

$$\varphi = \varepsilon \left(1 - \frac{h_o}{H} \right) \quad (1.65)$$

Для определения коэффициента массоотдачи в газовой фазе для пластинчатой насадки, исходя из диссипативного подхода получено уравнение [48]:

$$\beta_{zs} = 1,6B^{1/4} \left(\frac{h_k W_z}{t_g^2 \cdot d_k} \right)^{1/4} \cdot \frac{H}{1 - \frac{h_k}{H}} \cdot \frac{D_z^{1/2}}{v_z^{1/4}}, \quad (1.66)$$

где $B = \frac{\varphi}{1 - \varphi} C_{wi} \cdot \Phi^2 \left(\frac{\theta_g}{\varepsilon_0} \right)^3$ - корректирующий коэффициент.

Средний диаметр капель определялся по уравнению:

$$d_k = B_d \frac{\sigma^{0,9} v_{жс}^{0,3} \varepsilon_0^{0,6}}{\theta_g^{0,4} \rho_{жс}^{0,2} \rho_z^{0,7} v_z^{0,2} g \varepsilon^{0,3} U_{жс}^{0,3} U_z} \cdot \left(\frac{1 + \cos \alpha}{\cos \alpha} \right)^{0,3}. \quad (1.67)$$

Для аппарата с регулярной подвижной пластинчатой насадкой при больших плотностях орошения получено уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в газовой фазе [29] в следующем виде:

$$\beta_{zs} = 5,44 \cdot C_k^{1/4} \left(\frac{\varphi}{1 - \varphi} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{h_k}{t_g - h_k} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{H}{t_g} \right)^{1/4} \cdot \frac{U_z^{3/4} D_z^{1/2}}{d_k^{1/4} v_z^{1/4}}, \quad (1.68)$$

где диаметр капель:

$$d_k = B_k \frac{1}{\xi_L^{0,26}} \cdot \frac{\delta_{пл}^{0,6} \rho_{жс}^{0,14} \sigma^{0,4}}{U_z^{0,8} \rho_L^{0,54}}. \quad (1.69)$$

Для аппарата с пластинчатой насадкой при плотностях орошения до $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ [50] получено уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в газовой фазе в следующем виде:

$$\beta_{zs} = 73 \frac{\xi_L}{(1 - \varepsilon) \varepsilon_0^{4/5} \Phi^{3/5}} \cdot \frac{W_z^{4/5} \rho_z^{2/5} v_z^{4/3}}{d_k^{3/5} \sigma^{2/3} D_z^{1/3}}, \quad (1.70)$$

где диаметр капель

$$d_{\kappa} = 26,8 \left(\frac{\pi \cdot \sigma^{9/5} \rho_{nl}^{6/5} \varepsilon_0^{18/5}}{\xi_L^{6/5} \rho_{жс}^{19/5} \rho_z^{8/15} W_z^{18/5}} \right)^{1/3}. \quad (1.71)$$

При использовании единого диссипативного подхода автором [51] получено уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в газовой фазе:

$$\beta_{zs} = B_{\beta_{zs}} \cdot \left[\frac{D_z^2 \cdot C_k \cdot U_z^3 \cdot (h_0 - h_{nl})}{\varphi_{яч} (t_b - h_{nl}) \cdot d_k \cdot v_z} \right]^{1/4}, \quad (1.72)$$

где $B_{\beta_{zs}}$ – коэффициент пропорциональности, определяемый опытным путем, который составил для

пластинчатой насадки $B_{\beta_{zs}} = 7,8 \left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/4}$;

трубчатого пучка с круглыми трубами $B_{\beta_{zs}} = 8,68 \left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/4}$;

шаровой насадки $B_{\beta_{zs}} = 7,97 \left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/4}$.

Для расчета коэффициента массоотдачи в жидкой фазе предложено [29] уравнение:

$$\beta_{жс} = 8,2 \xi_L^{1/4} (1 - \varepsilon_L)^{1/4} \left(\frac{\rho_z}{\rho_{жс}} \right)^{1/4} \left(\frac{H}{t_6} \right)^{1/4} \cdot \frac{U_z^{3/4} D_{жс}^{1/2}}{(h_{\kappa} + h_{nl})^{1/4} v_{жс}^{1/4}} \quad (1.73)$$

Автором [47] получено уравнение для определения коэффициента массоотдачи в жидкой фазе:

$$\beta_{жс} = K_{\kappa} \frac{\rho_z^{0,6} \cdot U^{1,2} D_m^{0,5}}{v_{жс}^{0,12} \rho_{жс}^{0,2} \cdot \sigma^{0,3} d_n^{0,08}} + K_{nl} \frac{U_{жс}^{2/3} g^{0,08} D_m^{0,5}}{v_{жс}^{0,5} d_n^{0,08}}, \quad (1.74)$$

где коэффициент K_{κ} и $K_{nl} = 7,96$ и $7,66$, соответственно. Для определения коэффициента массоотдачи в газовой фазе:

$$Sh_z = A Re_z^{6/8} Sc^{-3/4} \quad (1.75)$$

Для аппаратов с регулярной вибрирующей, вращающейся пластинчатой круглой и квадратной формы [44 с.151,153] получены уравнения для определения коэффициента массоотдачи в газовой и жидкой фазах в следующем виде:

$$Sh_2^* = A_2 \cdot Re_2^{*3/4} \cdot Sc_2^{1/2}, \quad (1.76)$$

$$Sh_{жк}^* = A_{жк} \cdot Re_{жк}^{*3/4} \cdot Sc_{жк}^{1/2} \cdot K_\rho^{1/4}, \quad (1.77)$$

где $A_{\square} = B_r \left[\frac{\xi_L (1 - \varepsilon) t_g}{\delta_n \cdot \varphi_a} \right]^{1/4}$ - безразмерный параметр, характеризующий взаимодействие вихрей в орошаемом слое регулярной подвижной насадки, при определении коэффициента массоотдачи в газовой фазе; $A_{жк} = B_{жк} \left[\frac{\xi_L (1 - \varepsilon_0) \cdot t_g}{h_k} \right]^{1/4}$ - безразмерный параметр, характеризующий взаимодействие вихрей в газожидкостном слое при определении коэффициента массоотдачи в жидкой фазе.

Для расчета коэффициента интенсивности теплообмена E_a дана формула [50]:

$$E_0 = 1 - \frac{t_{м.к.} - t_{ж.к.}}{t_{м.н.} - t_{ж.н.}}. \quad (1.78)$$

Коэффициенты теплоотдачи α для пластинчатой насадки при плотностях орошения до $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ рассчитываются по формуле [50]:

$$\alpha = 0,86 \frac{\xi_L c_p^1}{(1 - \varepsilon) \varepsilon_0^{4/5} \Phi^{3/5}} \frac{W_2^{4/5} \rho_2^{2/5} v_2^{4/3}}{d_k^{3/5} \sigma^{2/5} D_2^{1/3}}. \quad (1.79)$$

В литературных источниках имеется мало сведений о применении классических конструкций аппаратов с регулярной подвижной насадкой в процессе пылеулавливания. Эти сведения относятся в основном для случаев, когда пылеулавливание является сопутствующим процессом, при проведении основных процессов массообмена или теплообмена.

Применение регулярной подвижной насадки осуществляется в комбинированных аппаратах, имеющих зону ударного взаимодействия газа с покоящейся жидкостью и контактную зону, где размещена регулярная подвижная насадка. Такие пылеуловители получили название инерционно-турбулентных аппаратов со взвешенной насадкой или регулярной подвижной насадкой (ИТПН) или аппаратов ударно-инерционного действия с регулярной подвижной насадкой (УИД с РПН).

В ИТПН или УИД с РПН используется механизм ударного взаимодействия газового потока с жидкостью, после чего энергия газа затрачивается на подъем и перемещение насадочных тел (аппараты ВН) или создание вихревой структуры газожидкостного слоя и колебание гирлянд с насадкой (аппараты РПН). Такие аппараты используются в основном в процессе пылеулавливания [3 с.43].

Гидродинамические показатели и параметры пылеулавливания в них определяются отдельно для зоны эжекции (зоны ударного взаимодействия газа и жидкости) и насадочной зоны.

В рамках проводимых нами исследований и обработки опытных данных рассмотрим методику расчета процесса пылеулавливания в аппарате ударно-инерционного действия с регулярной пластинчатой насадкой [44 с.192].

Суммарная эффективность процесса пылеулавливания в аппарате УИД с РПН рассчитывают по формуле:

$$\eta_{\text{общ}} = 1 - (1 - \eta_{St_k}) (1 - \eta_D), \quad (1.80)$$

где η_{St_k} и η_D – эффективность улавливания частиц за счет инерционного и диффузионного осаждения, соответственно.

Эффективность пылеулавливания за счет инерционного механизма рассчитывают по формуле:

$$\eta_{St_k} = 1 - \exp \left(-\frac{3}{2} \cdot \frac{m_y \cdot K_3 \cdot \mathcal{G}_{\text{отн}} \cdot t_{\square}}{U_{\square} \cdot d_{\square}} \right), \quad (1.81)$$

где $m_y = \frac{V_{\square}}{V_{\square}}$ – величина удельного орошения, м³/м³; $\mathcal{G}_{\text{отн}} = |u_{\text{ч}} - u_{\text{к}}|$ – скорость осаждения частиц на капли, м/с; $u_{\text{к}}$ – скорость движения капель, м/с; $d_{\text{к}}$ – диаметр капель, м; K_3 – коэффициент захвата.

Коэффициент захвата рассчитывают по уравнению:

$$K_3 = \frac{St_k^2}{(St_k + 0,25)^2} \cdot \left(e^{-5,1 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{d_{\text{к}}}{d}} - e^{-4,5 \frac{\ell_{\text{к}}}{d_{\text{к}}}} \right), \quad (1.82)$$

где $St_k = \frac{\rho \cdot d \cdot u}{18 \mu_{\square} \cdot d_{\text{к}}}$ – критерий Стокса; μ_{\square} – динамическая вязкость газа, Па·с;

$d_{\text{ч}}$ – диаметр частиц, м; $\ell_{\text{к}} = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{\square} - \rho_{\square})}}$ – капиллярная постоянная, м;

σ – поверхностное натяжение, Н/м.

Диаметр капель жидкости в насадочной зоне рассчитывают по формуле:

$$d_{\text{к}} = B_{\text{к}} \cdot \xi_L^{1/3} \frac{\rho_{\square}^{1/6} \cdot d_{\square\square\square}^{2/3} \sigma^{1/3} \cdot U_{\square}}{U_{\square\square\square}^{5/3} \rho_{\square}^{1/2}}, \quad (1.83)$$

здесь $d_{\text{стр}}$ – диаметр струи, м; $u_{\text{стр}}$ – скорость струи, м.

Эффективность пылеулавливания за счет диффузионного осаждения рассчитывают по формуле:

$$\eta_D = 1 - (1 - \eta') \cdot (1 - \eta''), \quad (1.84)$$

где η' и η'' – эффективность пылеулавливания зоны эжекции и насадочной зоны.

Эффективность пылеулавливания зоны эжекции рассчитывают по формуле:

$$\eta' = B'_k \cdot \left(\frac{W_{\square\square} d_{k1}}{D'_{\square}} \right)^{-1/4}, \quad (1.85)$$

а эффективность пылеулавливания насадочной зоны по формуле:

$$\eta'' = B''_k \cdot \left(\frac{W_r \cdot d_k}{D''_{T\square}} \right)^{-1/4}. \quad (1.86)$$

Входящие в выражения (1.85) и (1.86) коэффициенты турбулентной диффузии рассчитывают по уравнениям:

для зоны эжекции:

$$D'_{\square} = B_1 (\xi \cdot \epsilon_{\square})^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho_c}{\rho_c} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{1}{\Delta h} \right)^{1/3} \cdot d_{k1}^{4/3} \cdot W_{\epsilon\square} \cdot Stk; \quad (1.87)$$

для насадочной зоны:

$$D''_{T\square} = B_2 (\xi_L)^{1/3} \cdot (1 - \epsilon_0)^{1/3} \cdot \left(\frac{H}{t_B} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho_c}{\rho_{ж}} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{1}{h_0} \right)^{1/3} \cdot d_k^{4/3} \cdot u_c \cdot Stk. \quad (1.88)$$

Диаметр капель, образующихся в зоне эжекции, рассчитывают по формуле:

$$d_{\square} = B_{\square} \cdot \frac{\sigma^{3/5} \cdot (1 - \varphi_{\square})^{2/5} \Delta h^{2/5}}{\rho_{\square}^{1/5} \cdot \rho_{\square}^{2/5} \cdot W_{\square\square}^{6/5}}. \quad (1.89)$$

Таким образом, проведен анализ работы аппаратов со взвешенной и регулярной насадкой, а также расчетных уравнений для определения их основных характеристик, таких как гидродинамические показатели, массообмен, теплообмен и пылеулавливание.

1.3 Постановка задач исследований

Аппараты с подвижной насадкой были созданы для проведения основных процессов химической технологии, для которых требовалась аппаратура, способная в интенсивных режимах эффективно и с малыми энергозатратами проводить процессы тепломассообмена и пылеулавливания. Кроме того, эта аппаратура должна была обеспечить стабильность тепломассообменных характеристик и параметров пылеулавливания при изменении нагрузок, иметь неизменную эффективность при масштабном переходе, обладать простотой конструкции и эксплуатации, универсальностью, нечувствительностью к загрязнениям обрабатываемых газов и жидкостей, иметь низкую материалоемкость.

В различной степени этим требованиям отвечают известные конструкции аппаратов со взвешенной и регулярной насадкой.

Аппараты с подвижной насадкой (взвешенной и фонтанирующей) успешно внедрены на многих промышленных предприятиях, благодаря высокой эффективности, простоте конструкции и нечувствительности к загрязненности газожидкостной среды твердыми примесями.

Вместе с тем, в аппаратах с подвижной насадкой значительная часть энергии газового потока затрачивается на подъем насадочных элементов и удержании их во взвешенном состоянии, вследствие чего эти аппараты имеют повышенное гидравлическое сопротивление.

При выборе контактных устройств в большинстве случаев критерием является энергетические затраты на проведение процесса. Поэтому, имея низкое гидравлическое сопротивление, аппараты с регулярной насадкой при прочих равных условиях становятся предпочтительными по сравнению с другими типами аппаратов ПН.

Регулярность размещения насадочных элементов в контактной зоне аппарата позволяет полнее использовать энергию газового потока для создания вихревой структуры с малым гидравлическим сопротивлением. В них также обеспечивается возможность достижения режима одновременного вихреобразования (синфазного режима), зависящего от геометрической формы насадочных тел и шагов расположения элементов в вертикальном направлении. Выполнение регулярной насадки в виде пучка труб дает дополнительные преимущества, так как помимо проведения основных процессов в контактной зоне аппарата (абсорбции, пылеулавливания и т.д.) в трубах может быть организовано движение теплоносителя, причем без смешения с газожидкостным слоем. Подвод или отвод тепла в зоне взаимодействия потоков обеспечивает эффективное проведение многих хемосорбционных процессов.

Анализ работы рассмотренных аппаратов позволил разработать конструкции аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой, в которых сочетаются преимущества взвешенной и регулярно размещенной насадок. Данные преимущества заключаются в использовании вихревого взаимодействия потоков газа и жидкости с механической очисткой внутренних поверхностей контактной зоны. Это важно для случаев работы с потоками,

содержащими твердые частицы, обладающими повышенными адгезионными свойствами. Исследования таких аппаратов в настоящее время отсутствуют.

В связи с вышеизложенным, для проведения комплексных исследований аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой и разработки научно обоснованной методики расчета необходимо выполнение следующих задач:

- изучение закономерностей взаимодействия газовой и жидкой фаз в контактной зоне комбинированной регулярно-взвешенной насадки с помощью визуального наблюдения и статистической обработки фотографий структуры слоя;

- получение расчетных зависимостей для определения удельной поверхности трубчато - шаровой насадки (трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей), их объемной порозности, а также эквивалентного диаметра;

- экспериментальное исследование гидродинамических характеристик регулярно-взвешенной насадки с одним и двумя слоями шаровой насадки, а также с одной нижней опорно-распределительной решеткой и секционированной несколькими опорно-распределительными решетками;

- экспериментальное исследование гидродинамических характеристик регулярно-взвешенной (трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей) насадки при изменении режимных параметров и получение расчетных зависимостей;

- определение частотных характеристик газожидкостного слоя в объеме комбинированной регулярно-взвешенной насадки и получение уравнения для их расчета;

- экспериментальное исследование процессов массо- и теплообмена в контактной зоне комбинированной регулярно-взвешенной насадки при изменении режимных параметров и получение уравнений для расчета коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи;

- экспериментальное исследование процесса пылеулавливания в аппарате с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой при изменении режимных параметров;

- разработка математической модели турбулентно-диффузионного осаждения твердых частиц и получение формул для расчета коэффициента турбулентной диффузии и эффективности пылеулавливания;

- разработка научно-обоснованной инженерной методики расчета аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой и рекомендаций по проектированию и эксплуатации;

- промышленная апробация результатов исследования.

2 ГИДРОДИНАМИКА АППАРАТА С КОМБИНИРОВАННОЙ РЕГУЛЯРНО-ВЗВЕШЕННОЙ НАСАДКОЙ

2.1 Описание технологической схемы экспериментальной установки и методик проведения исследований

Технологическая схема установки для исследования гидродинамических параметров и тепломассообменных характеристик представлена на рисунке 2.1. Экспериментальная установка включала модель аппарата квадратного сечения (340x340 мм), выполненную из оргстекла.

Поток воздуха, нагнетаемый вентилятором 1, поступает через сборную емкость в колонный аппарат 10 сечением 340x340мм и высотой рабочей зоны 1,3 м. Затем, проходя через трубчатый пучок 8 и дискретные контактные элементы 11, орошаемые жидкостью, поступающей через ороситель 7, выбрасывается в атмосферу. Расход воздушного потока регулируется шибером 2 по показаниям стандартной диафрагмы с дифманометром. Орошающая жидкость из нижней емкости аппарата 10 через промежуточную емкость 9 насосом 3 подается в напорный бак 5, откуда через ороситель 7 поступает на орошение. Расход воды регулируется вентилем 6 по показаниям ротаметра.

В технологической схеме предусмотрена подача теплоносителя в трубное пространство по замкнутому контуру включающим насос 3, напорную емкость 5 с нагревательным устройством 4 и трубчатый пучок 8.

Кроме того, дискретные контактные элементы (шары) могут располагаться на опорно-распределительной решетке, расположенной в нижней части насадочной зоны, а также насадочная зона может быть секционирована несколькими опорно-распределительными решетками со слоем дискретных контактных элементов.

В зависимости от конструкции опорно-распределительных решеток аппарат может быть преобразован в комбинированный аппарат со взвешенной насадкой (ВН) и фонтанирующей насадкой (ФН).

Диапазон изменения:

режимных параметров:

– скорость газа w_r - 1÷5 м/с;

– плотность орошения L - 10÷75 м³/м²·ч;

– температура воздуха $t_{\text{возд.}}$ = 20÷100 °С;

– температура теплоносителя в трубчатом пучке $t_{\text{ж}}$ = 16÷100 °С;

конструктивных параметров:

– шаг между трубами по вертикали t_v/b - 4;

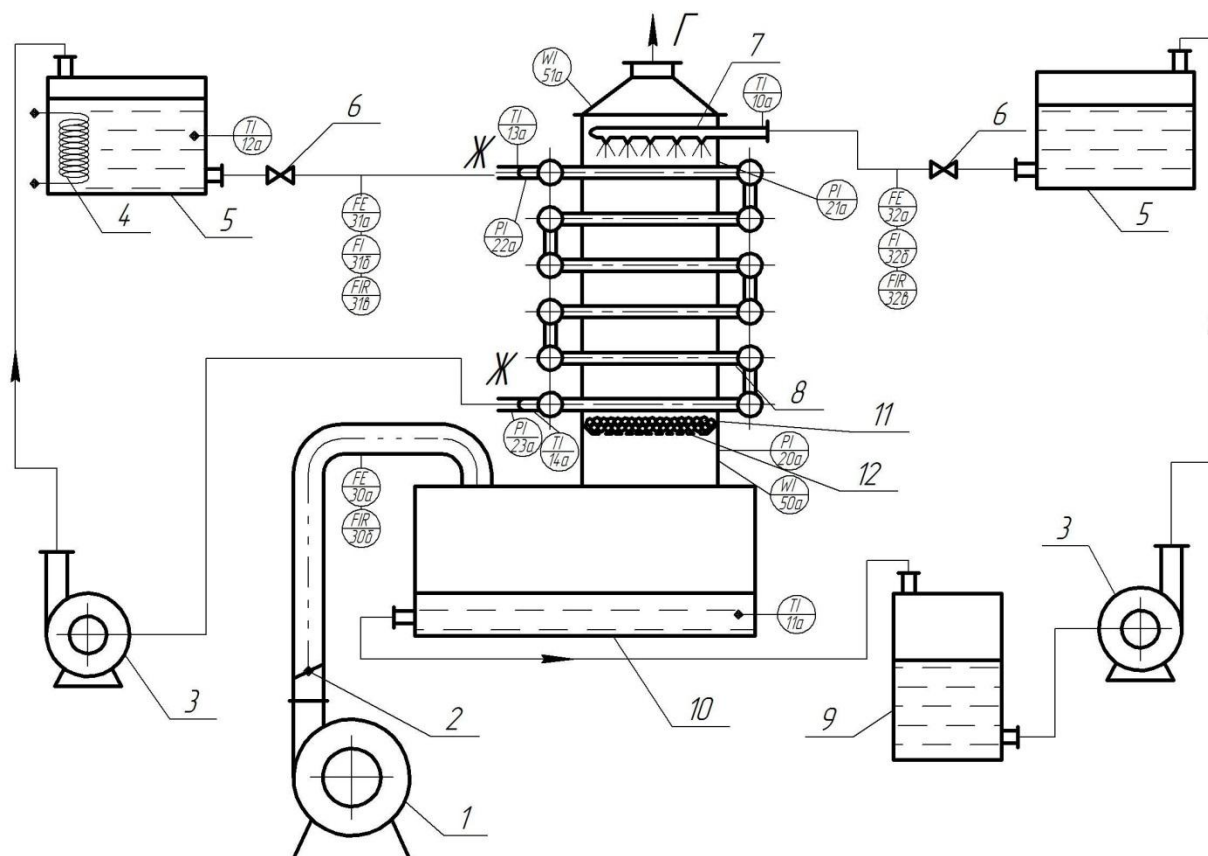
– шаг между трубами по горизонтали t_p/b - 2;

– размер насадочных элементов:

трубчатая насадка: $d_{\text{тр}} = 0,025$ м; $\ell = 0,34$ м;

шаровая насадка: $d_{\text{ш}} = 0,015$ м; высота статического слоя $H_{\text{ст}} = 0,015 \div 0,03$ м.

– опорно-распределительная решетка (свободное сечение): плоская $S_0 > 0,95$ м²/м²; пирамидальная $S_k/S_{\text{ап}} = 0,28$ м²/м².



1 – вентилятор; 2 – шибер; 3 – насос; 4 – нагревательное устройство; 5 – напорная емкость; 6 – вентиль; 7 – ороситель; 8 – трубчатый пучок; 9 – промежуточная емкость; 10 - аппарат с трубчатой насадкой; 11 – дискретные контактные элементы; 12 – опорно-распределительная решетка.

Рисунок 2.1 - Технологическая схема установки для исследования гидродинамических параметров и тепломассообменных характеристик аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой

Гидравлическое сопротивление аппарата ΔP измерялось дифференциальным манометром и контролировалось прибором типа ДСР.

Количество удерживаемой жидкости, отнесенное к сечению колонны h_0 , определялось методом «отсечки» [56 с.333]. Для этого одновременно перекрывался шибер на газовом тракте, и закрывались вентили подачи орошающей жидкости (рисунок 2.1). Количество удерживаемой жидкости замерялось при помощи мерных емкостей.

Для определения **коэффициентов массоотдачи в газовой фазе, отнесенных к сечению аппарата $\beta_{гс}$ или к его объему $\beta_{гв}$** , использовали широко применяемую методику, основанную на изучении процесса адиабатического испарения воды в воздух [57,58].

Согласно данной методики значения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе, отнесенные к сечению аппарата $\beta_{гс}$ и объему $\beta_{гв}$ рассчитывали по следующим формулам:

$$\beta_{\square s} = \frac{W_{\square} \cdot \gamma_{\square} \cdot \Delta x \cdot R \cdot T_k \cdot P_0}{M_{H_2O} \cdot \Delta P_{cp}} \quad (2.1)$$

и

$$\beta_{\square v} = \frac{\beta_{\square s}}{H} \quad (2.2)$$

В уравнении (2.1) движущая сила процесса рассчитывалась по уравнению:

$$\Delta P_{cp} = \frac{P_{\square} - P_{\square}}{\ln \frac{P^* - P_{\square}}{P^* - P_{\square}}} \quad (2.3)$$

В уравнениях (2.1)÷(2.3):

γ_{\square} – удельный вес воздуха, Н/м³;

$\Delta x = x_k - x_n$ – разность влагосодержаний, кг/кг;

P_0 – общее давление, определенное по барометру, Па;

M_{H_2O} – молекулярный вес воды, кг/моль;

R – газовая постоянная, Дж/(моль·град);

T_k – температура, °К;

P^* – равновесное давление водяных паров, Па;

P_n и P_k – парциальные давления водяных паров в воздухе, рассчитанное по показаниям сухого и мокрого термометров, установленных до и после аппарата, Па.

Относительное влагосодержание воздуха определяли по диаграмме i - x влажного воздуха [59], а также рассчитывали [60] по уравнениям:

$$x_n = 0,622 \cdot \frac{P_{\square}}{P_0 - P_{\square}}; \quad (2.4)$$

$$x_k = 0,622 \cdot \frac{P_{\square}}{P_0 - P_{\square}}. \quad (2.5)$$

Методика исследования **коэффициентов теплоотдачи α** [61].

Средние значения α по результатам опытов рассчитывались по формуле:

$$\alpha = \frac{G_2 c_p' (t_{сн.} - t_{ск.})}{F \cdot \Delta t_{cp.l}}, \quad (2.6)$$

где: G_2 – массовый расход воздуха, кг/ч.;

$t_{сн.}$ и $t_{ск.}$ – соответственно начальная и конечная температура газа, °С;

c_{pv} – теплоемкость влажного воздуха; кДж/(кг·К);

F – поверхность контакта, м²;

$\Delta t_{cp.l}$ – средняя логарифмическая разность температур, °С;

$$\Delta t_{cp.l.} = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{\ln \frac{\theta_{\max}}{\theta_{\min}}}, \quad (2.7)$$

где θ_{\max} и θ_{\min} - соответственно наибольший и наименьший температурные напоры между потоками °С.

Наибольший и наименьший температурный напор между потоками, согласно схемы противоточного движения воздуха и воды и изменением температур, определяется следующим образом:

$$\theta_{\max} = t_{c.n} - t_{ж.к.}; \quad \theta_{\min} = t_{c.к} - t_{ж.n.}. \quad (2.8)$$

Температура воздуха по мокрому термометру измерялась психрометрическим методом, основанном на одновременном измерении температуры сухим и влажным (мокрым) термометрами. Измерения производились психрометрами Асмана снабженных ртутными термометрами с ценой деления 0,1°С.

При измерении параметров влажного не насыщенного воздуха сухой чувствительный элемент показывает температуру паровоздушной смеси, а с влажной поверхности второго чувствительного элемента испаряется вода. Испарение ее обусловлено тем, что парциальное давление водяных паров в ненасыщенном воздухе меньше, чем у смоченной поверхности чувствительного элемента измерительного прибора. В результате испарения затрачивается тепло как окружающего воздуха, так и воды, содержащейся в смоченном материале чехла. Температура воды понижается и достигает предельного значения в условиях, когда затрачиваемое на испарение тепло полностью отбирается из окружающего воздуха. Тем самым температура воздуха по мокрому термометру характеризует температуру насыщенного воздуха в условиях испарения воды, когда тепло для испарения полностью берется из окружающего воздуха.

Коэффициент массоотдачи в газовой фазе β_{ds} определяли по формуле (2.9):

$$\beta_{ds} = \frac{G_2 \cdot \ln \frac{d_1}{d_2}}{F \cdot \rho \cdot 3600}, \quad (2.9)$$

где d_1 и d_2 – влагосодержание влажного воздуха на входе и выходе из аппарата, кг/кг сухого воздуха.

Формула для вычисления влагосодержания влажного воздуха может быть получена из характеристического уравнения:

$$d = 0.622 \frac{P_n}{(P_{\bar{o}} - p_n)}, \quad (2.10)$$

где p_n – парциальное давление водяного пара в воздухе, мм. рт. ст;

$P_{\bar{o}}$ – барометрическое давление, мм. рт. ст.

Величину парциального давления водяного пара в воздухе определяли по показаниям сухого t_c и мокрого t_m термометров с учетом реальных условий измерения:

$$p_n = p_{n.m} - A_n (t_c - t_m) \cdot P_{\bar{o}}, \quad (2.11)$$

где $p_{n.m}$ – давление насыщения при наблюдаемой температуре воздуха по мокрому термометру, мм. рт. ст;

A_n – психрометрический коэффициент.

Величина психрометрического коэффициента зависит от скорости движения воздуха у смоченной поверхности чувственного элемента измерительного прибора и вычисляется по выражению:

$$A_n = 0.00001 \cdot \left(65 + \frac{6.75}{v} \right). \quad (2.12)$$

Согласно Закону Дальтона давление смеси нескольких газов при установившемся состоянии равно сумме давлений газов, составляющих эту смесь. Следовательно, общее давление влажного атмосферного воздуха $P_{\bar{o}}$ равно сумме давлений сухой его части и водяных паров

$$P_{\bar{o}} = p_c + p_n. \quad (2.13)$$

Общее давление влажного воздуха $P_{\bar{o}}$ находят замером по барометру величины давления атмосферного воздуха. $P_{\bar{o}.з}$ и внесением в него поправок:

$$P_{\bar{o}} = P_{\bar{o}.з} \pm \Delta H_{cm} \pm \Delta p_1 \pm \Delta p_2 \pm \Delta p_3, \quad (2.14)$$

где ΔH_{cm} – поправка на статическое давление (берется со знаком плюс) или разрежение (со знаком минус) воздушного потока на измерительном участке по сравнению с атмосферным давлением;

Δp_1 – поправка на температуру воздуха, берется по специальным таблицам;

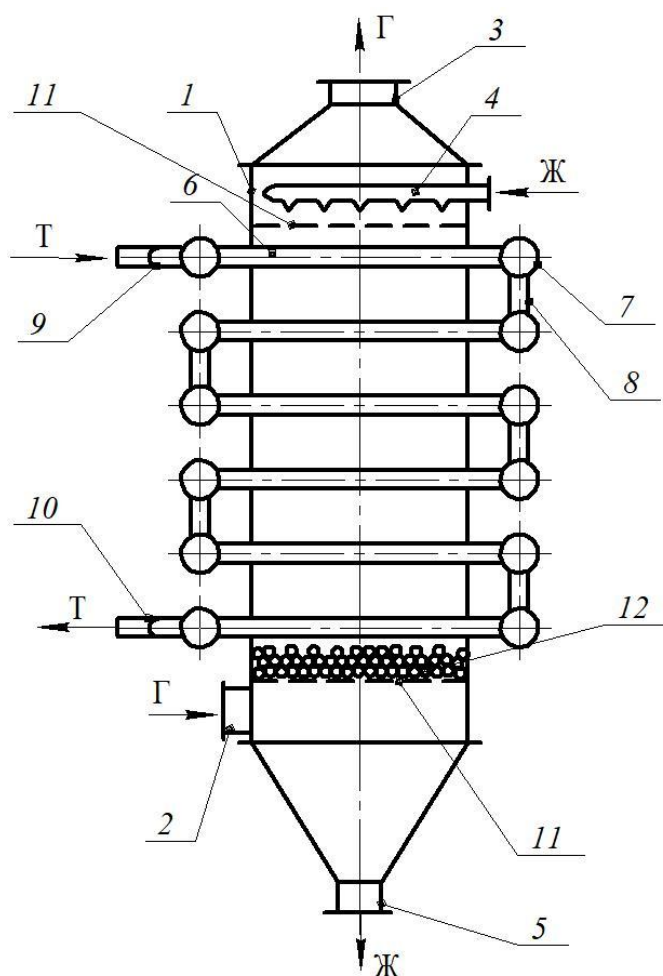
Δp_2 – поправка на высоту места измерения (по специальным таблицам);

Δp_3 – инструментальная поправка (по паспорту прибора).

2.2 Конструкции аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой и расчет конструктивных параметров насадки

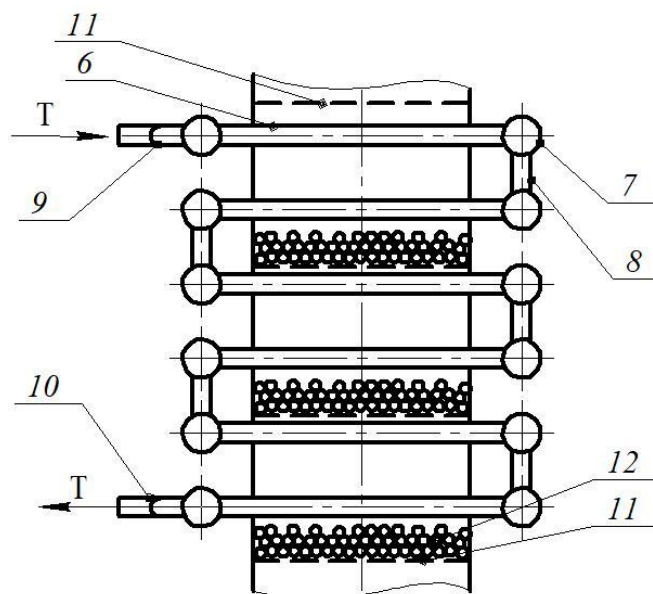
Объектами исследований явились аппараты с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой двух типов: трубчато-взвешенной [6] и трубчато-фонтанирующей насадкой [7].

На рисунке 2.2 представлена конструкция аппарата с трубчато-взвешенной насадкой. Рисунок 2.2а аппарат, имеющий одну нижнюю опорно-распределительную решетку; рисунок 2.2б фрагмент корпуса аппарата с насадкой секционированного несколькими опорно-распределительными решетками со слоем дискретных контактных элементов.



а) общий вид аппарата с трубчато-взвешенной насадкой, имеющего одну нижнюю опорно-распределительную решетку

Рисунок 2.2 - Аппарат с трубчато-взвешенной насадкой, лист 1



б) фрагмент корпуса аппарата с насадкой секционированного несколькими опорно-распределительными решетками со слоем дискретных контактных элементов
 1 – корпус; 2 – штуцер для ввода газа; 3 - штуцер для вывода газа; 4 – ороситель; 5 – патрубок для слива отработанной жидкости; 6 – трубчатая насадка; 7 – коллекторы; 8 – соединительный штуцер; 9 – патрубок подачи теплоносителя; 10 – патрубок для слива теплоносителя; 11 – опорно-распределительная решетка; 12 - слой дискретных контактных элементов (шаров)

Рисунок 2.2, лист 2

На рисунке 2.3 приведена фотография рабочей зоны аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой, на рисунке 2.4 вид сбоку.

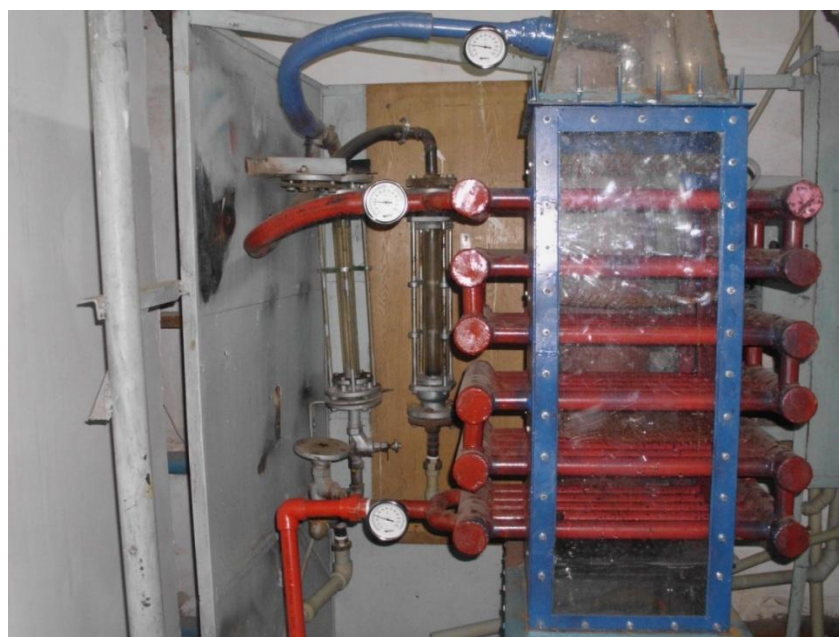


Рисунок 2.3 – Рабочая зона аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой



Рисунок 2.4 – Аппарат с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой (вид сбоку)

На рисунке 2.5 приведена фотография рабочей зоны аппарата с трубчато-взвешенной насадкой (плоские опорно-распределительные решетки). На рисунке 2.6 рабочая зона аппарата с трубчато-взвешенной насадкой (загрузка дискретными контактными элементами (шарами)).

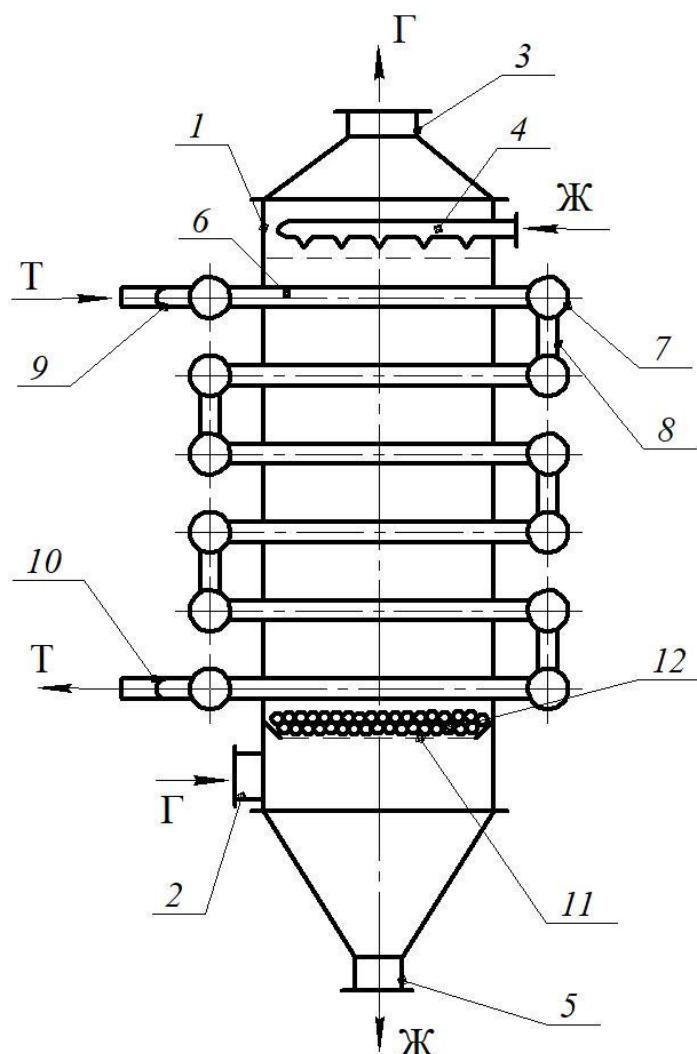


Рисунок 2.5 – Рабочая зона аппарата с трубчато-взвешенной насадкой (плоские опорно-распределительные решетки)



Рисунок 2.6 – Рабочая зона аппарата с трубчато-взвешенной насадкой (загрузка дискретными контактными элементами (шарами))

На рисунке 2.7 представлена конструкция аппарата с трубчато-фонтанирующей насадкой.



1 – корпус; 2 – штуцер ввода газа; 3 – штуцер вывода газа; 4 – ороситель; 5 – патрубок для слива отработанной жидкости; 6 – трубчатая насадка; 7 – коллекторы; 8 – штуцеры; 9 – патрубок для подачи теплоносителя; 10 - патрубок для слива теплоносителя; 11 - конусные или пирамидальные опорно-распределительные решетки; 12 - слой дискретных контактных элементов

Рисунок 2.7 – Аппарат с трубчато-фонтанирующей насадкой

На рисунке 2.8 приведена фотография пирамидальной опорно-распределительной решетки (для аппарата с трубчато-фонтанирующей насадкой).

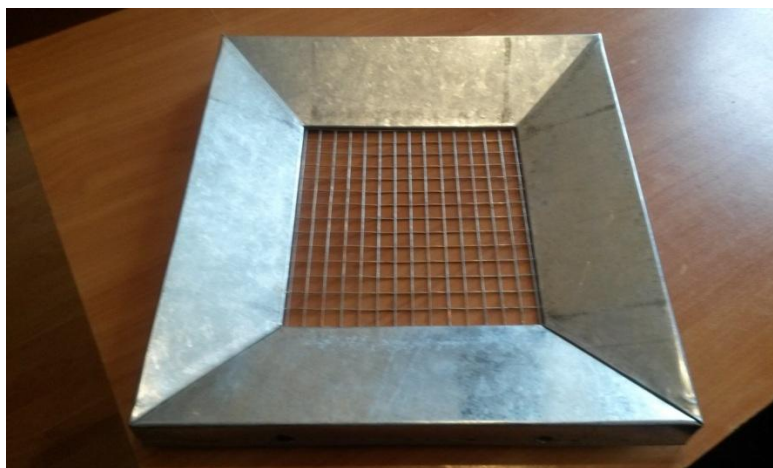


Рисунок 2.8 – Пирамидальная опорно-распределительная решетка (для аппарата с трубчато-фонтанирующей насадкой)

Известно [13], что в аппаратах с подвижной насадкой (ПН) применяются разнообразные насадочные тела, форма которых в большей мере определяет структуру газожидкостных потоков в рабочей зоне. Основными требованиями к ним являются обеспечение интенсивной турбулизации потоков и широкого диапазона устойчивой работы аппарата, однородности структуры слоя с целью предотвращения проскока газа и жидкости, а также высокая прочность и низкая стоимость. Кроме того, они должны иметь низкое гидравлическое сопротивление и не забиваться твердыми примесями. Материал насадки выбирается из условия химической и температурной стойкости в обрабатываемой среде.

Форма насадки должна обеспечивать равномерность взвешивания и наибольший диапазон устойчивой работы. В качестве насадок в аппаратах ПН наиболее предпочтительны сферические тела.

В рекомендациях к проектированию промышленных аппаратов с подвижной насадкой [3 с.44], [26,10 с.22] указывается, что скорость газа выбирается в диапазоне устойчивой и эффективной работы аппарата, т.е. в пределах 3,0 – 4,0 м/с. При скорости газа выше 4,5 м/с в аппарате рекомендуется устанавливать каплеуловитель.

В качестве элемента насадки служит шаровая насадка из пористой резины. Диаметр насадки 0,04 м, а плотность 650 кг/м³ [3 с.45], [26,10 с.22].

Статическая высота слоя насадки, обеспечивающая высокую эффективность аппарата составляет 0,2 м. В аппаратах диаметром более 2 м, для предотвращения возможности факельных прорывов газа рекомендуется увеличивать $H_{ст}$ до 0,3 ÷ 0,4 м [3 с.45], [26,10 с.22].

В аппаратах с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой в условиях стесненного движения взвешенных шаровых элементов принято использование шаров диаметром 0,015 м со статической высотой насадки 0,015-0,03 м.

Применительно к теплообменным аппаратам с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой получены уравнения для определения удельной поверхности трубчато-шаровой насадки (трубчато-взвешенной и трубчато-

фонтанирующей), их объемной порозности, а также уравнение для расчета ее эквивалентного диаметра [62].

Известно, что газ движется через насадку по извилистым каналам, образованным насадочными телами. Сечение этих каналов не постоянно по высоте аппарата и, следовательно, скорость газа также является переменной величиной. При изучении насадочных абсорберов исходят из средней скорости газа, которую находят делением объемного расхода газа на среднее сечение каналов [56 с.328].

Для насадочных аппаратов со стационарной насадкой [56 с.328] площадь сечения колонны S (м^2), высота насадки H (м) и ее свободный объем ε . Тогда объем пустот в насадке, т.е. объем каналов, по которым движется газ, составляет $SH\varepsilon$ (м^3). Средняя длина каналов (длина пути газа) равна Hk (здесь k – коэффициент, учитывающий извилистость каналов). Среднее значение каналов составляет:

$$S_{\text{кан}} = \frac{S \cdot H \cdot \varepsilon}{H \cdot k} = \frac{S \cdot \varepsilon}{k} \quad (2.15)$$

Величину $\omega = S_{\text{кан}}/S = \varepsilon/k$, равную отношению среднего сечения каналов к сечению колонны, называют живым сечением насадки [56 с.328].

Средняя скорость газа:

$$w = \frac{V_z}{S_{\text{кан}}} = \frac{V_z}{S \cdot \omega} = \frac{w_0 \cdot k}{\varepsilon}, \quad (2.16)$$

где $w_0 = V_z/S$ - скорость газа, отнесенная ко всему сечению колонны.

Обычно принимают $k=1$, тогда $\omega = \varepsilon$ и уравнение (2.16) принимает вид:

$$w = \frac{w_0}{\varepsilon} \quad (2.17)$$

Эквивалентный диаметр насадки определим как эквивалентный диаметр каналов, по которым движется газ [56 с.329]:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4\varepsilon}{a_n}, \quad (2.18)$$

где ε - объемная порозность насадки; a_n – удельная поверхность насадки в единице объема аппарата.

Для вывода уравнения эквивалентного диаметра насадки применительно к тепломассообменному аппарату с комбинированной регулярно–взвешенной насадкой [63] определим составляющие формулы (2.18).

Удельная поверхность трубчатой насадки рассчитывается по формуле:

$$a_{mp} = \frac{\pi d_{mp}}{2 \cdot t_p \cdot t_e}, \quad (2.19)$$

где t_p - величина шага между трубами в радиальном направлении; t_e - величина шага между трубами в вертикальном направлении.

Удельная поверхность шаровой насадки определим по формуле:

$$a_{ш} = \frac{\pi d_{ш}^2}{2 \cdot t_p \cdot t_e \cdot l} \quad (2.20)$$

Здесь l – размер эквивалентный длине труб, м. Для шаровой насадки можно представить:

$$l = m \cdot d_{ш} \quad (2.21)$$

Тогда

$$a_{ш} = \frac{\pi d_{ш}}{2 \cdot m \cdot t_p \cdot t_e} \quad (2.22)$$

Удельная поверхность трубчато - шаровой насадки составит:

$$a_{общ} = a_{mp} + a_{ш} = \frac{\pi(m \cdot d_{mp} + d_{ш})}{2 \cdot m \cdot t_p \cdot t_e} \quad (2.23)$$

Объемную порозность трубчатой насадки определим по формуле:

$$\varepsilon_{mp} = 1 - \frac{\pi d_{mp}^2}{2 \cdot t_p \cdot t_e} \quad (2.24)$$

Для определения объемной порозности слоя шаровой насадки определим объем слоя:

$$V_{сл} = h \cdot \varepsilon \cdot l, \quad (2.25)$$

В этом уравнении:

относительная высота - $h = n_1 \cdot d_{ш}$. Количество шаров $h/d_{ш} = n_1$;

относительная ширина - $\varepsilon = (t_p + d_{mp}) = n_2 \cdot d_{ш}$. Количество шаров

$(t_p + d_{mp})/d_{ш} = n_2$;

относительная длина слоя l .

Подставляя полученные значения в уравнение (2.25), получим:

$$V_{cl} = \frac{n_1 \cdot n_2 \cdot l \cdot \pi \cdot d_{u^2}}{6} \quad (2.26)$$

Единица объема аппарата:

$$V_{an} = 2 \cdot t_p \cdot t_e \cdot l \quad (2.27)$$

Тогда порозность шаровой насадки:

$$\varepsilon_{u^2} = 1 - \frac{V_{cl}}{V_{an}} = 1 - \frac{n_1 \cdot n_2 \cdot \pi \cdot d_{u^2}}{12 \cdot t_p \cdot t_e} \quad (2.28)$$

Объемная порозность трубчато-шаровой насадки:

$$\varepsilon_{обц} = 1 - \left[\frac{\pi \cdot (6 \cdot d_{mp}^2 + n_1 \cdot n_2 \cdot \pi \cdot d_{u^2})}{12 \cdot t_p \cdot t_e} \right] \quad (2.29)$$

Эквивалентный диаметр трубчато-шаровой насадки:

$$d_{э^2} = \frac{2 \cdot m \cdot [12 \cdot t_p \cdot t_e - \pi \cdot (6 \cdot d_{mp}^2 + n_1 \cdot n_2 \cdot d_{u^2})]}{3 \cdot \pi \cdot (m \cdot d_{mp} + d_{u^2})} \quad (2.30)$$

На рисунках 2.9 и 2.10 приведены результаты расчета по полученным уравнениям.

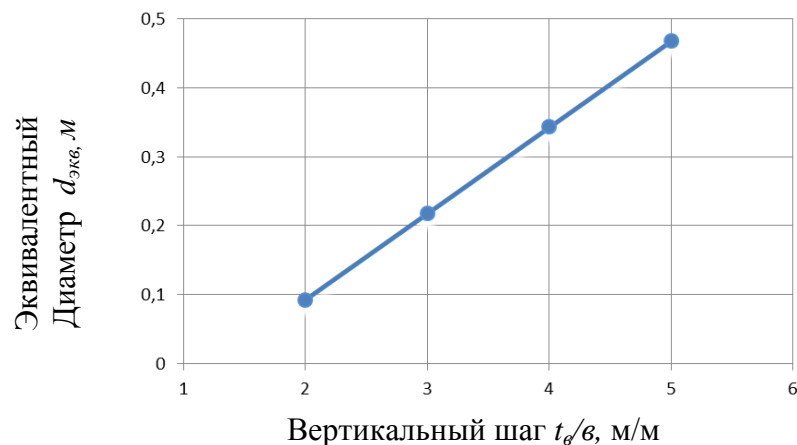


Рисунок 2.9 – Зависимость эквивалентного диаметра регулярно-взвешенной насадки $d_{э^2}$ от шагов расположения труб в вертикальном направлении t_e/v

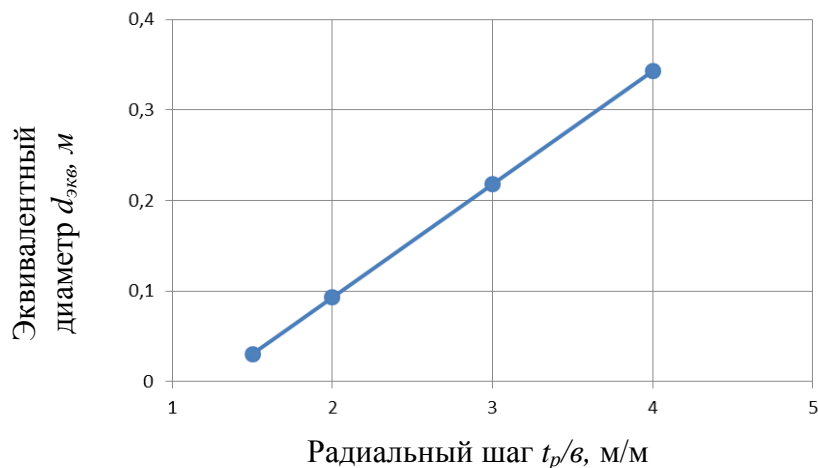


Рисунок 2.10 – Зависимость эквивалентного диаметра регулярно-взвешенной насадки $d_{экв}$ от шагов расположения труб в радиальном направлении t_p / b

Как видно из рисунка 2.9 при изменении шагов расположения труб в вертикальном направлении t_b/d от 2 до 5, также как и при изменении шагов расположения труб в радиальном направлении t_p/d от 1,5 до 2 (рисунок 2.10) значение величин $d_{экв}$ растут. Это очевидно, так как зависимость эквивалентного диаметра от шагов расположения труб прямо пропорциональна.

Расчет по уравнению (2.30) показывает, что с увеличением диаметра труб значения величин эквивалентного диаметра увеличиваются, тогда как с увеличением диаметра шаров снижается.

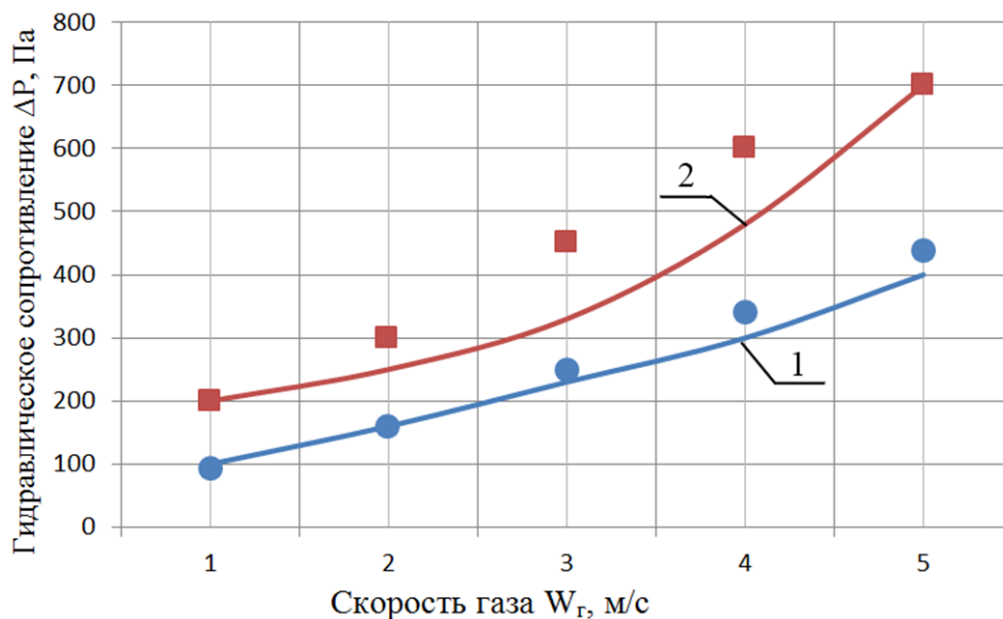
2.3 Закономерности взаимодействия газовой и жидкой фаз в контактной зоне комбинированной регулярно-взвешенной насадки

Для изучения закономерностей взаимодействия газовой и жидкой фаз в контактной зоне комбинированной регулярно-взвешенной насадки проведены исследования гидродинамических параметров, визуальные наблюдения и фотографирование структуры слоя.

Исследования проведены при неизменных конструктивных параметрах трубчатой насадки ($t_b/b=4$; $t_p/b=2$) для плоских и конических опорно-распределительных решеток при отсутствии орошения и при подаче орошения:

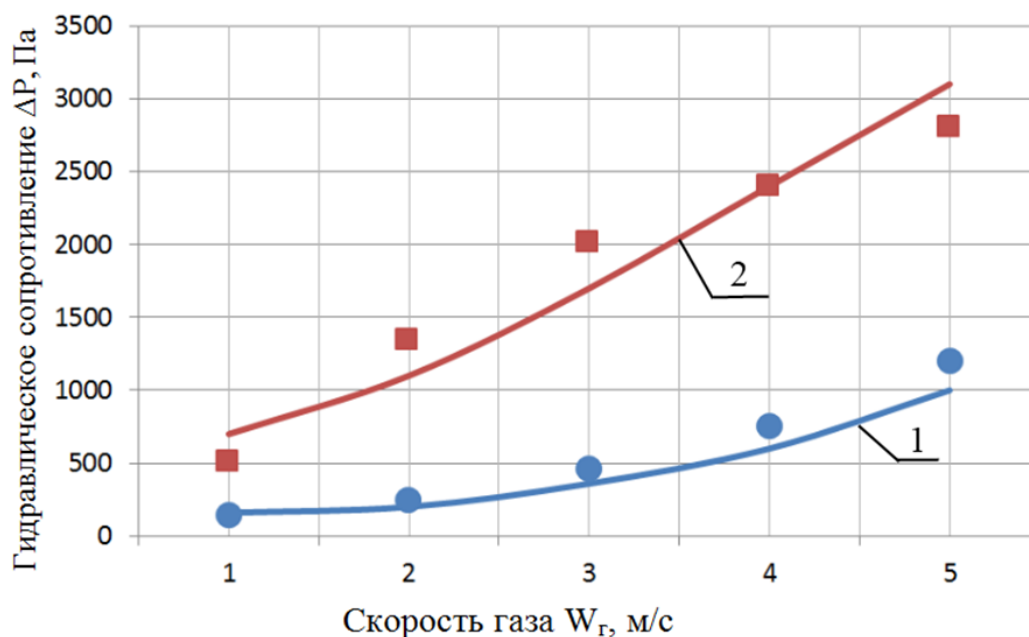
- с одним и двумя слоями шаровой насадки;
- с одной нижней опорно-распределительной решеткой и секционированной несколькими опорно-распределительными решетками.

Исследования гидравлического сопротивления аппаратов с трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей насадкой при секционировании двумя опорно-распределительными решетками с одним слоем шаров при отсутствии орошения и с орошением представлены на рисунках 2.11 и 2.12.



Условия опытов: две опорно-распределительные решетки; один слой шаровой насадки $H_{ст}=0,015$ м; $L=0$ м³/м²ч
 1 – $\Delta P^{ТВ}$ аппарата с трубчато-взвешенной насадкой; 2 – $\Delta P^{ТФ}$ аппарата с трубчато-фонтанирующей насадкой

Рисунок 2.11 – Гидравлическое сопротивление сухих аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой от скорости газа



Условия опытов: две опорно-распределительные решетки; один слой шаровой насадки $H_{ст}=0,015$ м; $L=15$ м³/м²ч
 1 – $\Delta P^{ТВ}$ аппарата с трубчато-взвешенной насадкой; 2 – $\Delta P^{ТФ}$ аппарата с трубчато-фонтанирующей насадкой

Рисунок 2.12 – Гидравлическое сопротивление орошаемых аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой от скорости газа

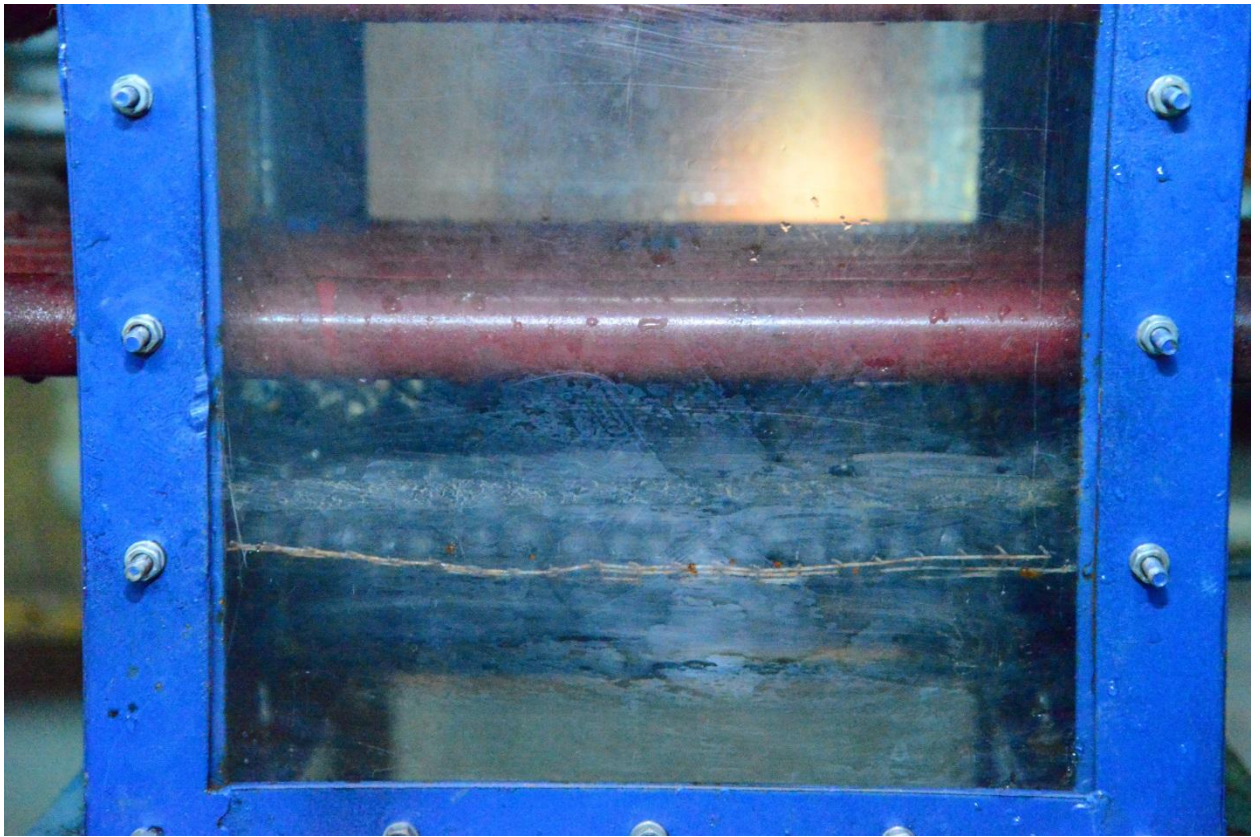
Как видно из рисунков гидравлическое сопротивление сухих и орошаемых аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой с увеличением скорости газового потока растет. При этом численные показатели гидравлического сопротивления являются значительными и применение секционированных аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой может быть экономически оправдано в случае их использования для очистки пыли, обладающей повышенными адгезионными свойствами. В связи с этим дальнейшие исследования нами проведены для аппаратов с одной нижней опорно-распределительной решеткой.

На рисунке 2.13 представлены фотографии слоя дискретных шаровых элементов в сухом аппарате с трубчато-взвешенной насадкой ($H_{ст}=0,03$ м; $L=0$ м³/м²ч).



$$w_r = 1 \text{ м/с}$$

Рисунок 2.13 – Фотографии слоя дискретных шаровых элементов, расположенных на плоской опорно-распределительной решетке при скорости газового потока от 1 до 5 м/с, лист 1



$w_r = 2 \text{ м/с}$



$w_r = 3 \text{ м/с}$

Рисунок 2.13, лист 2



$w_r = 4 \text{ м/с}$



$w_r = 5 \text{ м/с}$

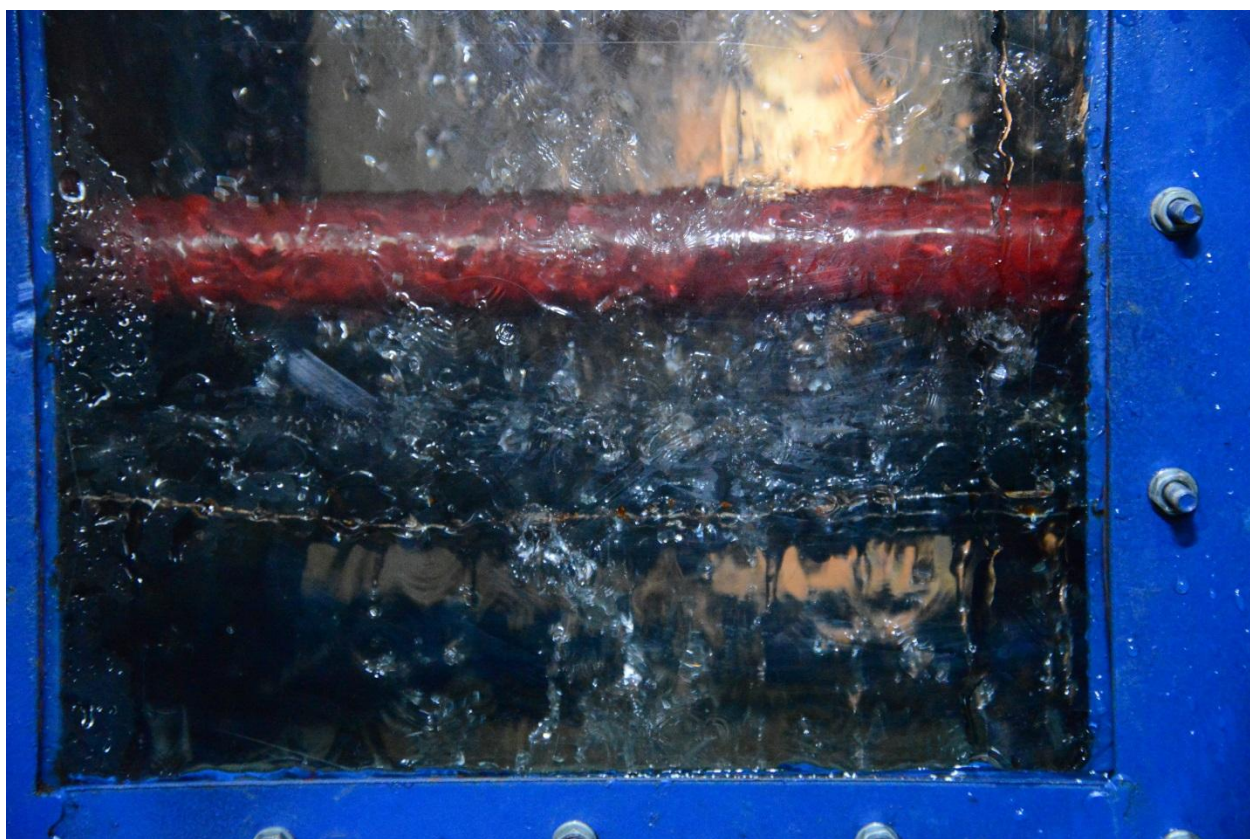
Рисунок 2.13, лист 3

Как видно из рисунка при скоростях газового потока от 1 до 3 м/с взвешивания шаровых элементов не происходит. Отмечается движение шаров по плоскости решетки.

При скорости газового потока 4 м/с наблюдается появление отдельных шаров над первым слоем труб трубчатой насадки. На самой опорно-распределительной решетке шары потоком газа отодвигаются к стенкам аппарата и образуются участки для факельного прорыва газа.

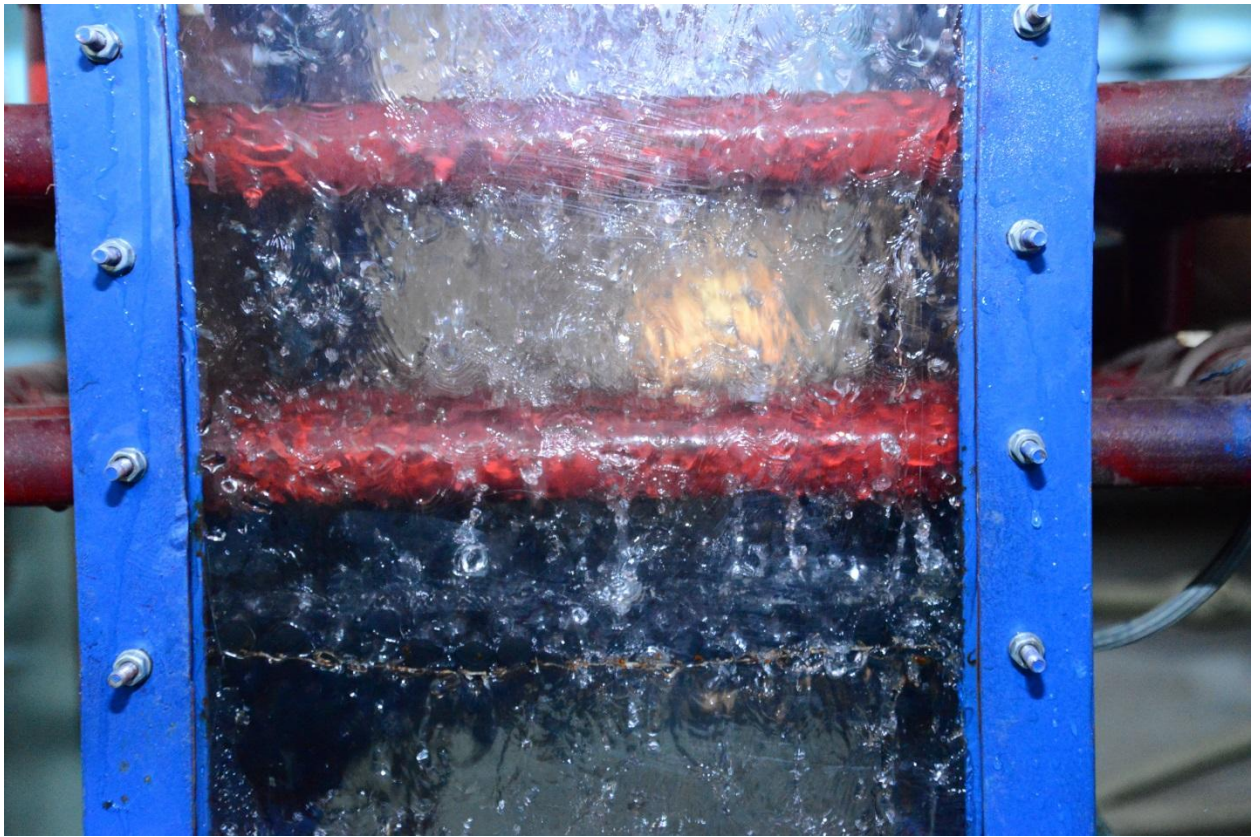
Увеличение скорости газового потока до 5 м/с способствует росту числа шаров выносимых за пределы первого слоя труб трубчатой насадки. При этом на опорно-распределительной решетке увеличиваются участки для свободного прохождения газового потока, а шаровые элементы в несколько слоев скапливаются у стенок аппарата.

На рисунке 2.14 представлены фотографии слоя дискретных шаровых элементов в орошаемом аппарате с трубчато-взвешенной насадкой ($H_{ст}=0,03$ м; $L=15$ м³/м²ч).

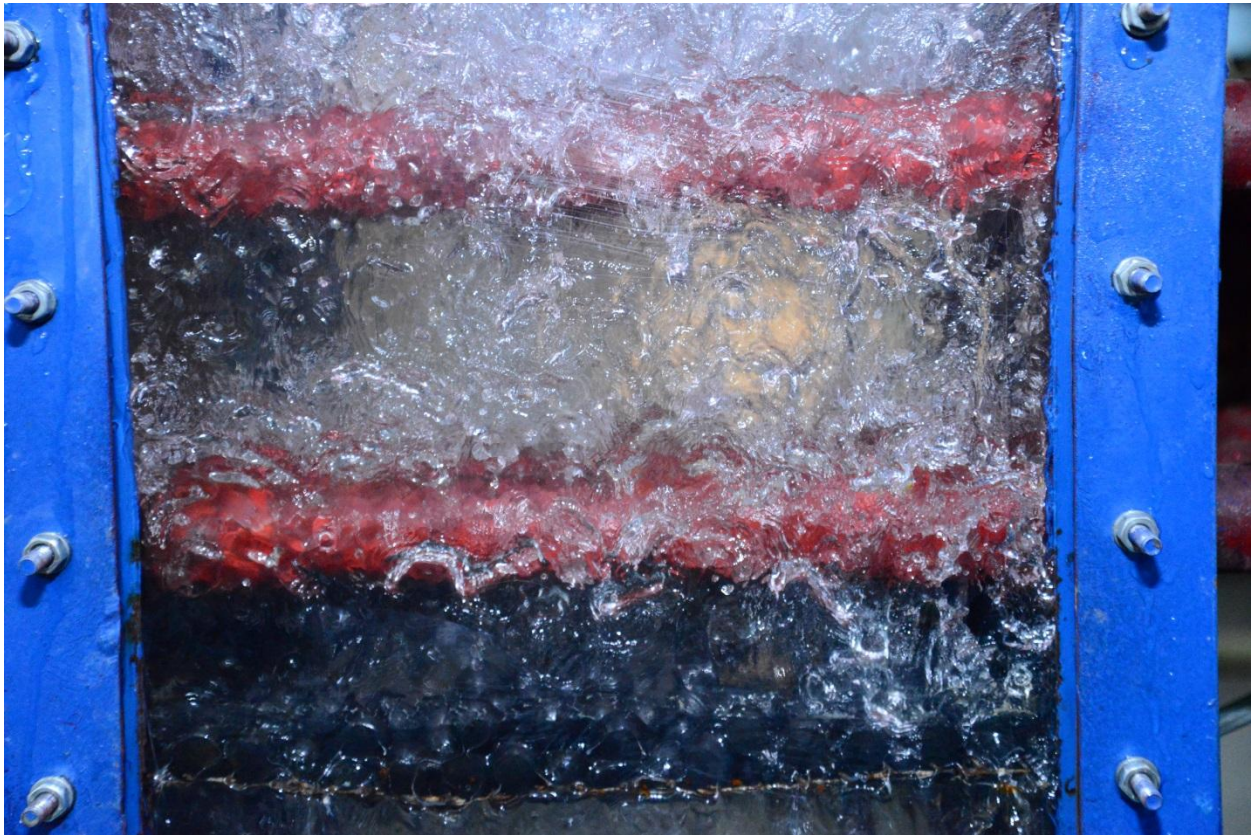


$w_r = 1$ м/с

Рисунок 2.14 – Фотографии слоя дискретных шаровых элементов, расположенных на плоской опорно-распределительной решетке при скорости газового потока от 1 до 5 м/с и плотности орошения $L=15$ м³/м²ч, лист 1



$w_r = 2 \text{ м/с}$

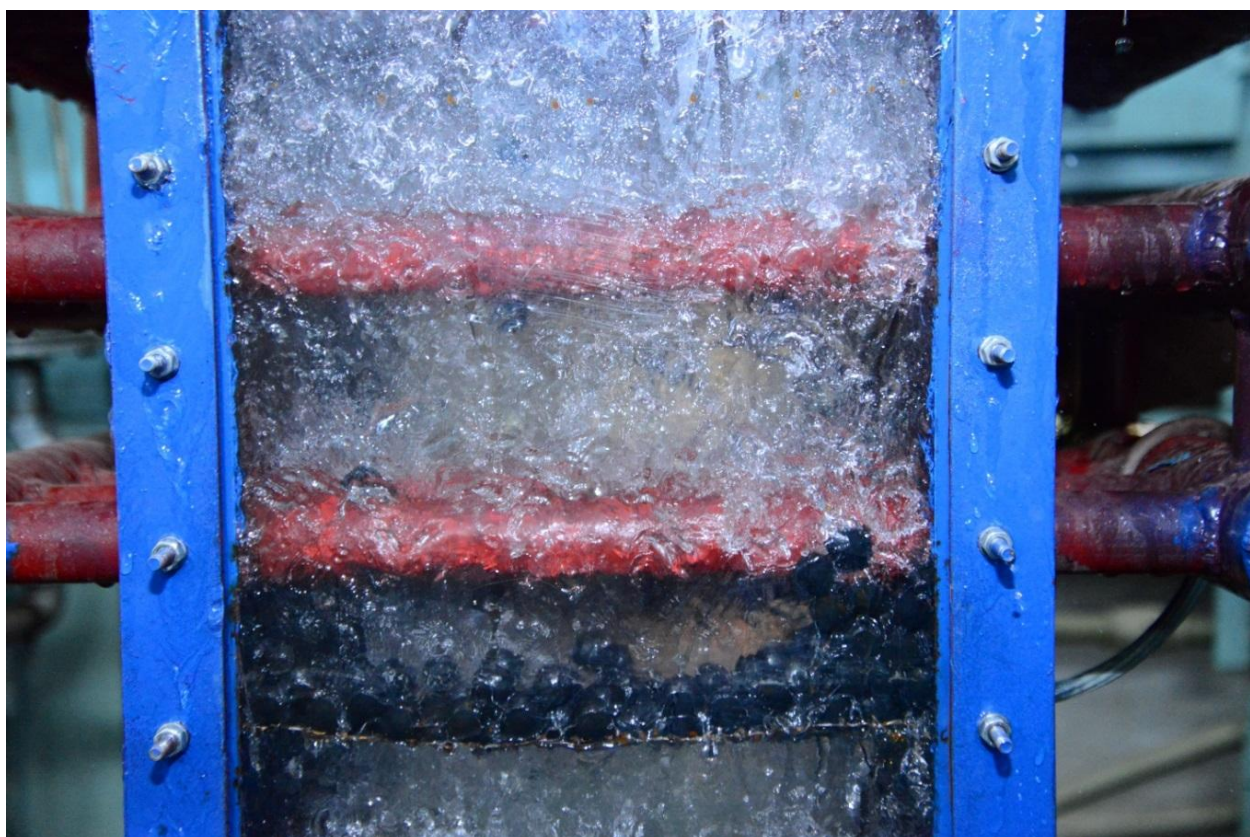


$w_r = 3 \text{ м/с}$

Рисунок 2.14, лист 2



$w_r = 4 \text{ м/с}$



$w_r = 5 \text{ м/с}$

Рисунок 2.14, лист 3

Из рисунка 2.14 видно, что при наличии орошения даже при скорости газа 1 м/с отмечается задержка жидкости в слое дискретных шаровых элементов и вплоть до 3 м/с происходит перемешивание слоя шаров и находящейся в нем жидкости. Снизу опорно-распределительной решетки жидкость стекает крупными струями и их скоплением. Над дискретным слоем наблюдается вынос жидкости.

При скорости газового потока 4 м/с образуется высоко турбулизированный газожидкостной слой, размеры которого выходят за первый слой труб трубчатой насадки. Наблюдается вынос шаровых элементов за первый и второй слои труб.

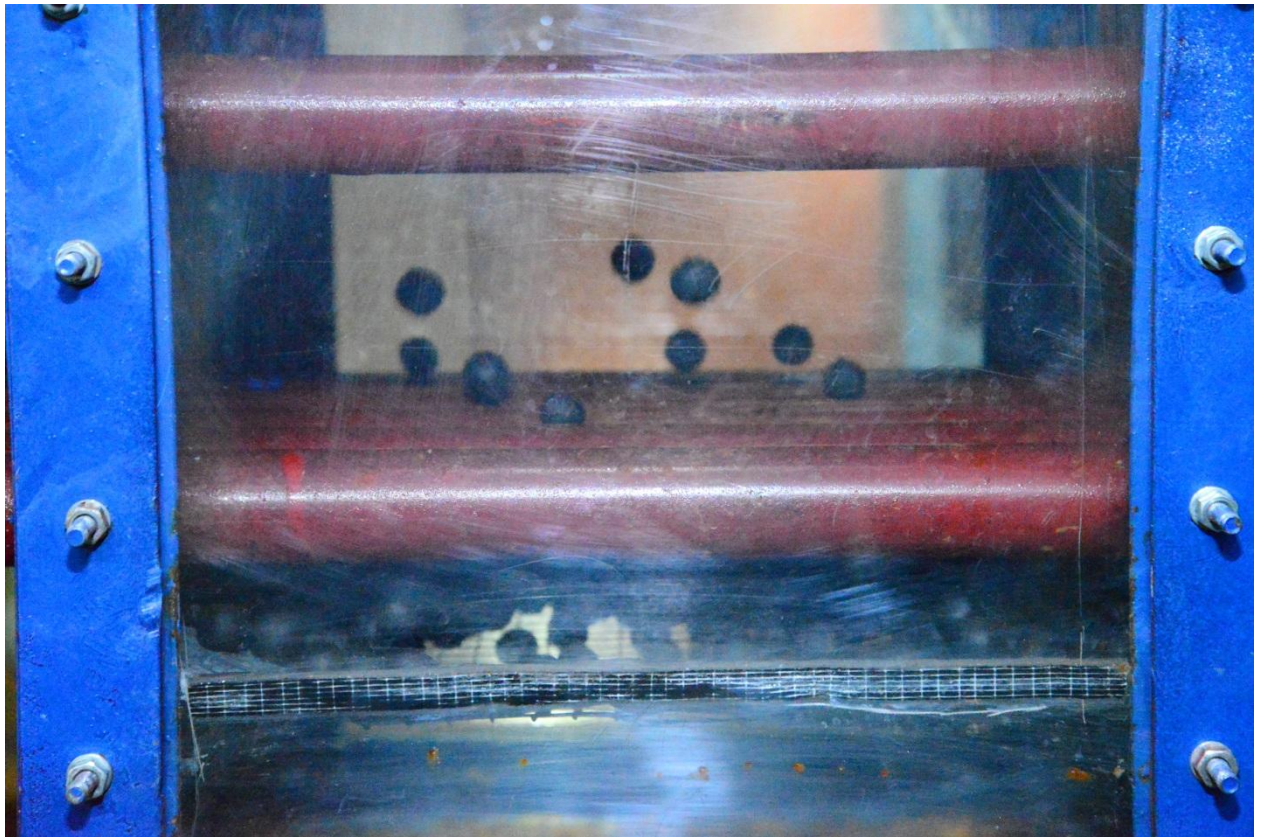
При скорости газового потока 5 м/с размеры турбулизированного газожидкостного слоя растут и этот слой виден после каждого ряда труб. Шаровые элементы достигают пространства между третьим и четвертым рядами труб трубчатого пучка.

На рисунке 2.15 представлены фотографии слоя дискретных шаровых элементов в сухом аппарате с трубчато-фонтанирующей насадкой ($H_{ст}=0,03$ м; $L=0$ м³/м²ч).

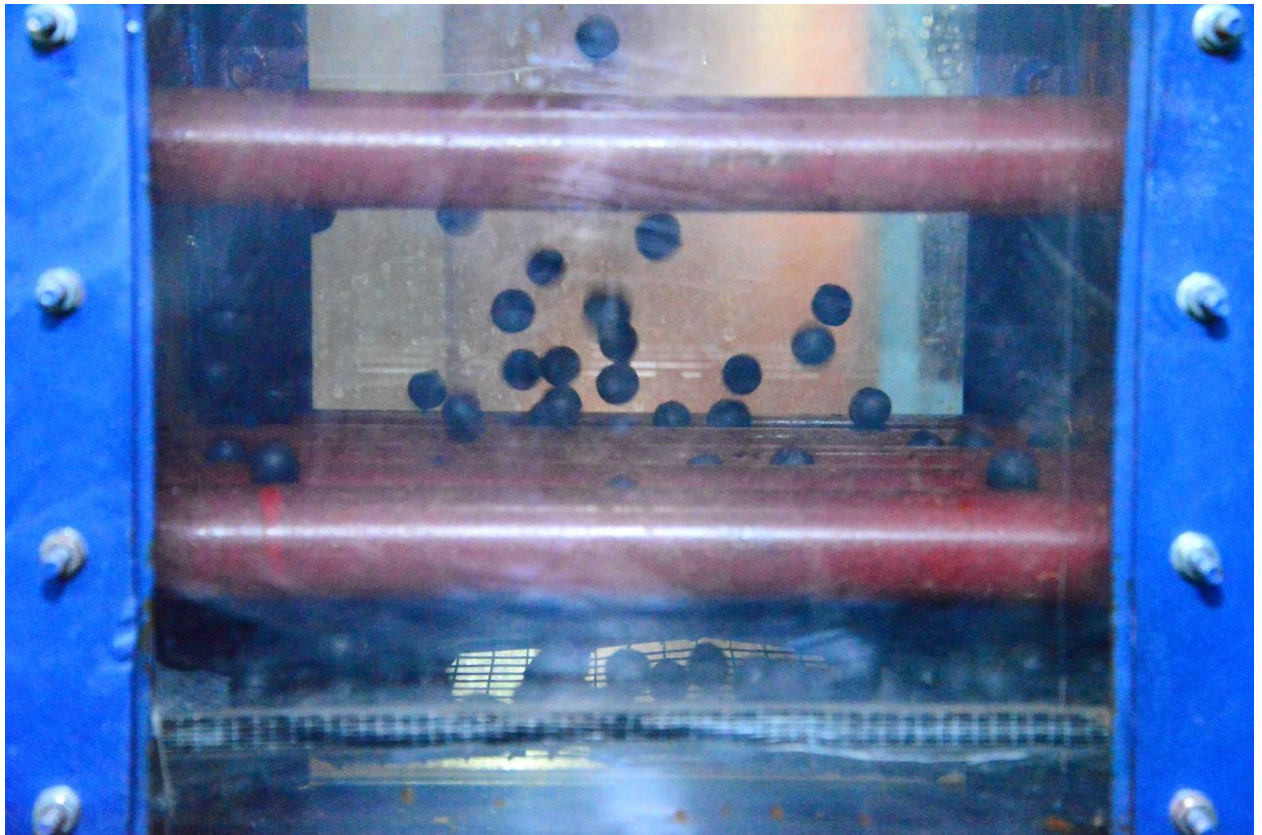


$w_r = 1$ м/с

Рисунок 2.15 – Фотографии слоя дискретных шаровых элементов, расположенных на пирамидальной опорно-распределительной решетке при скорости газового потока от 1 до 5 м/с, лист 1



$w_r = 2 \text{ м/с}$



$w_r = 3 \text{ м/с}$

Рисунок 2.15, лист 2



$w_r = 4 \text{ м/с}$

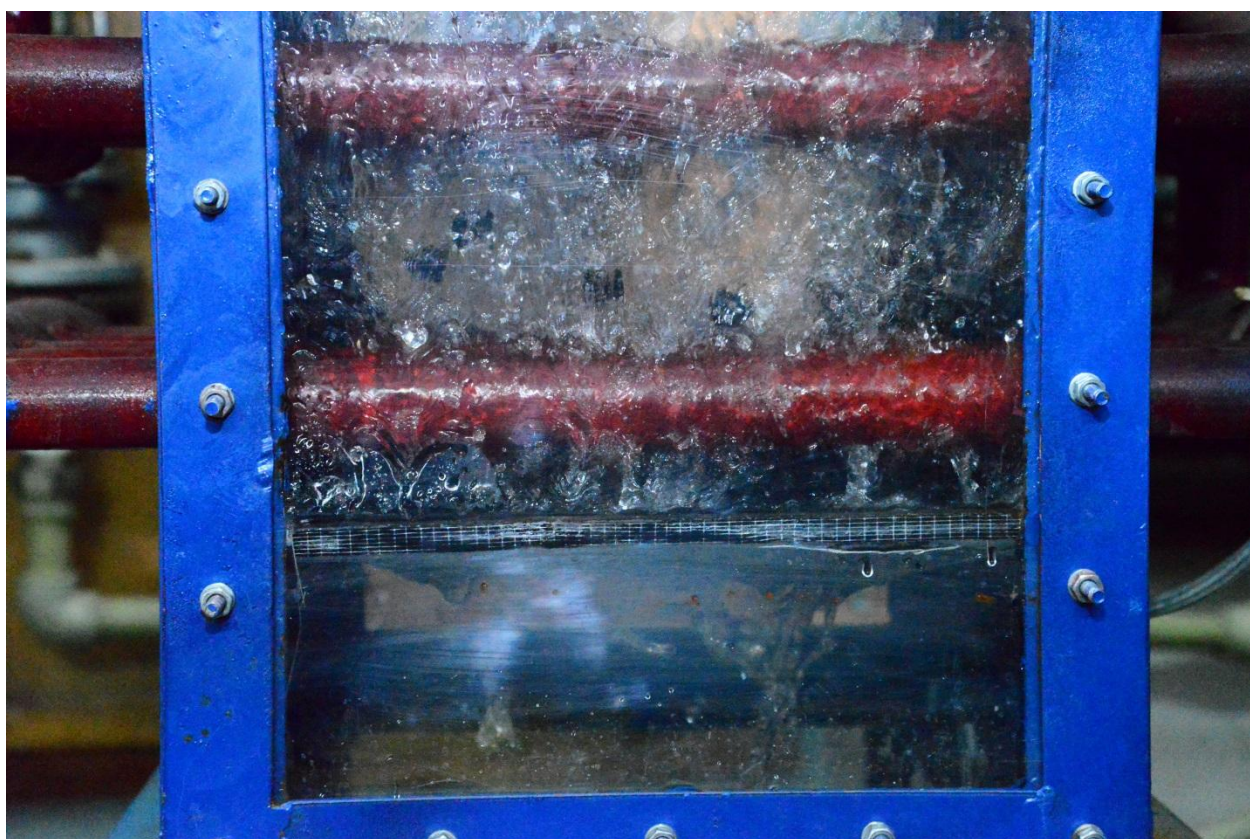


$w_r = 5 \text{ м/с}$

Рисунок 2.15, лист 3

Как видно из рисунка взвешивание шаров начинается уже с 1 м/с. С увеличением скорости газового потока до 5 м/с взвешенный слой расширяется, заполняя пространство между первым, вторым и третьим рядами труб трубчатого пучка. При скорости газа 5 м/с наблюдаются равномерно заполненные пространства взвешенными шарами между опорно-распределительной решеткой и первым рядом труб, а также между первым и вторым и вторым и третьим рядами труб.

На рисунке 2.16 представлены фотографии слоя дискретных шаровых элементов в орошаемом аппарате с трубчато-фонтанирующей насадкой ($H_{ст}=0,03$ м; $L=15$ м³/м²ч).

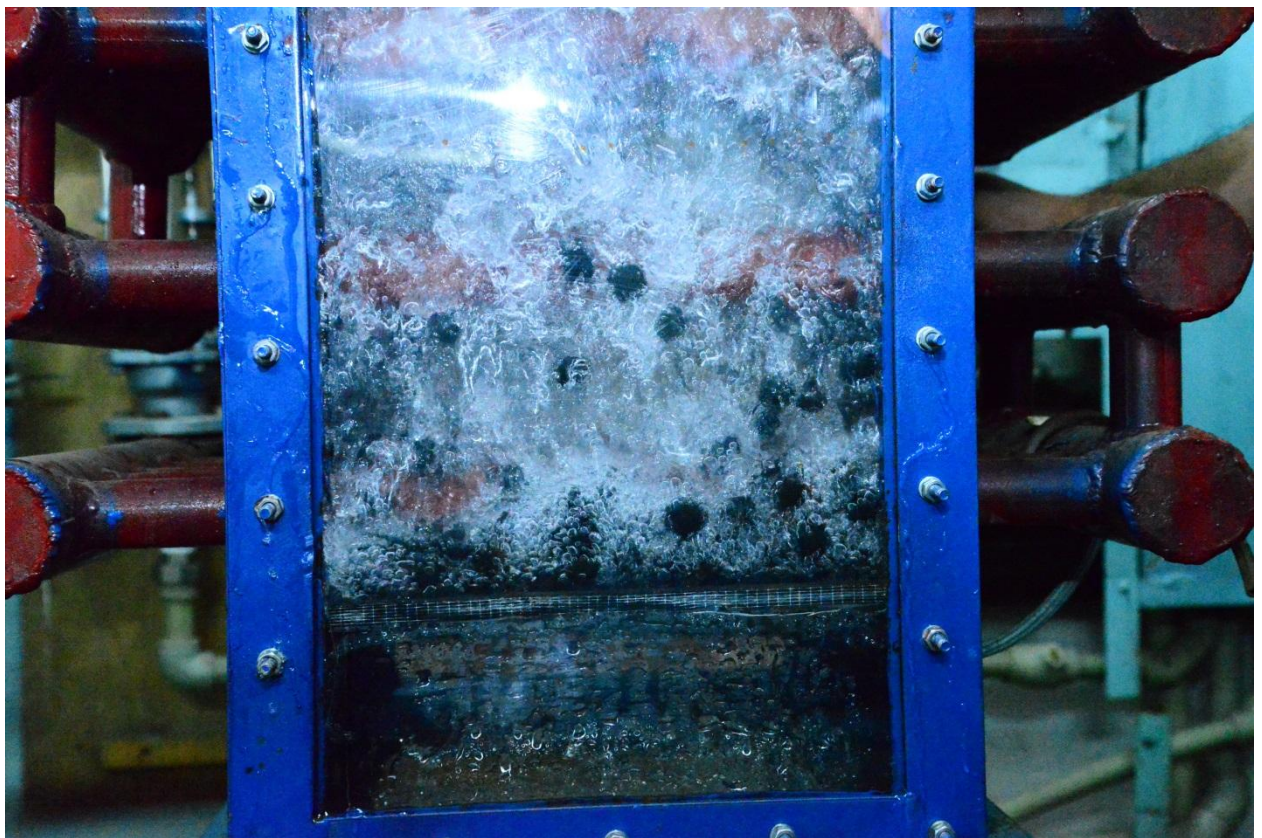


$w_r = 1$ м/с

Рисунок 2.16 – Фотографии слоя дискретных шаровых элементов, расположенных на пирамидальной опорно-распределительной решетке при скорости газового потока от 1 до 4м/с и плотности орошения $L=15$ м³/м²ч, лист 1

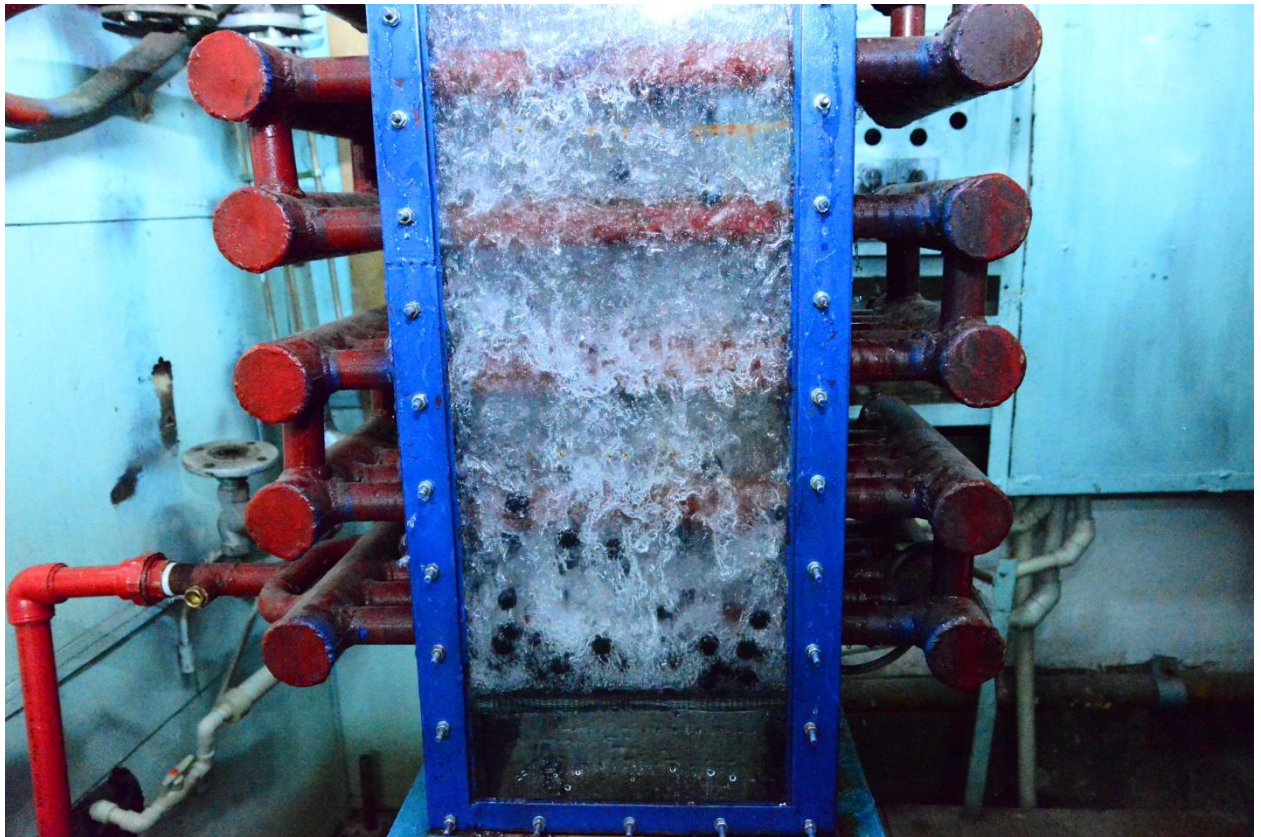


$w_r = 2 \text{ м/с}$



$w_r = 3 \text{ м/с}$

Рисунок 2.16, лист 2



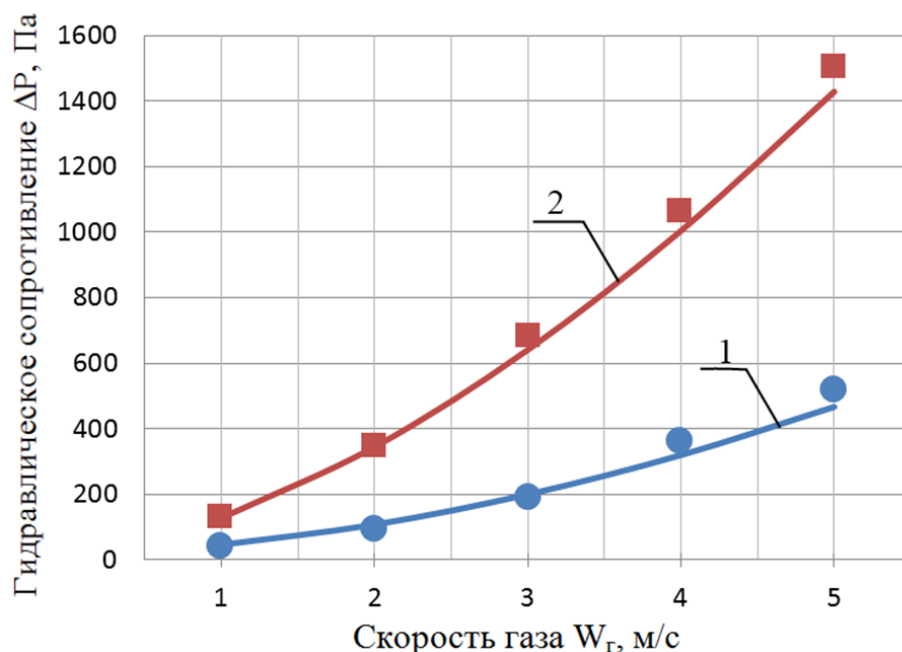
$$w_r = 4 \text{ м/с}$$

Рисунок 2.16, лист 3

Как видно из рисунка увеличение скорости газового потока от 1 до 2 м/с приводит к формированию газожидкостного слоя, в котором жидкая фаза представлена каплями и их конгломератами. Дальнейшее увеличение скорости газа до 4 м/с приводит к изменению структуры слоя, в котором преобладают пузыри газа. Шаровые элементы рассредоточены по всему объему газожидкостного слоя.

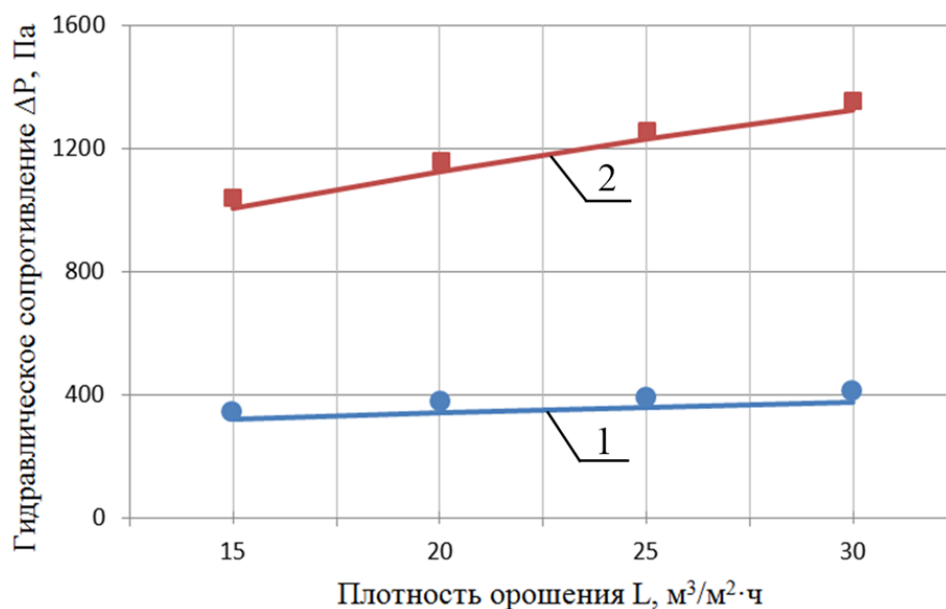
Увеличение скорости газа до 5 м/с привело к нестабильности работы аппарата и уносу большого количества жидкости. Поэтому достоверные замеры в этом случае получить не удалось.

На рисунках 2.17 и 2.18 представлены графики зависимостей гидравлического сопротивления, а на рисунках 2.19 и 2.20 количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя аппаратов с трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей насадкой при изменении скорости газового потока и плотности орошения. Конструктивные параметры трубчатой насадки оставались постоянными $t_b/b=4$; $t_p/b=2$.



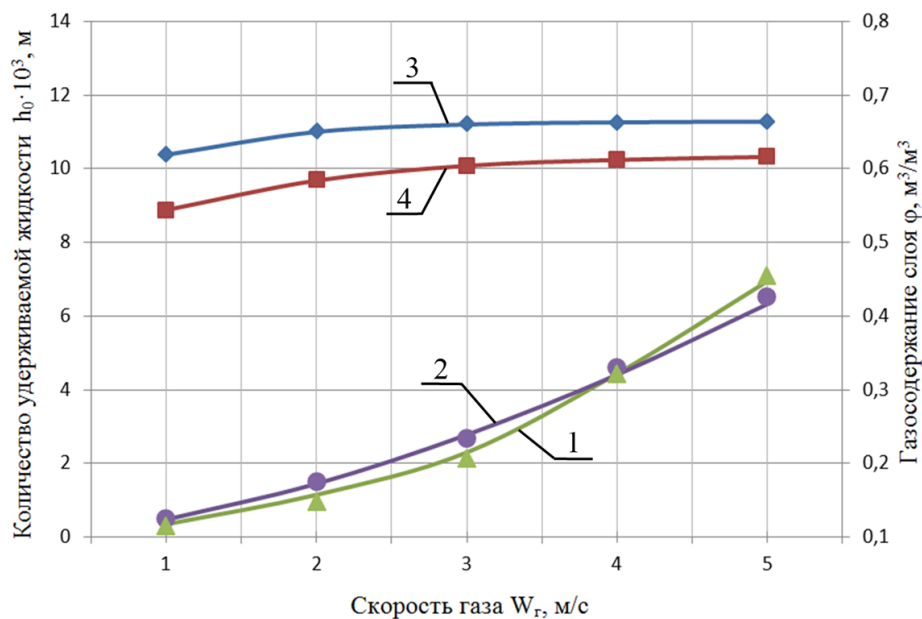
Условия опытов: одна опорно-распределительная решетка; $\rho_H = 600 \text{ кг/м}^3$; $d_H = 0,015 \text{ м}$; $H_{ст} = 0,03 \text{ м}$; $S_k/S_{ап} = 0,28 \text{ м}^2/\text{м}^2$; $L = 15 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$
 1 - $\Delta P_{ТВ}$ – трубчато-взвешенная насадка; 2 - $\Delta P_{ТФ}$ – трубчато-фонтанирующая насадка

Рисунок 2.17 – Зависимость гидравлического сопротивления аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой от скорости газа



Условия опытов см. рисунок 2.17; $w_g = 4 \text{ м/с}$
 1 - $\Delta P_{ТВ}$ – трубчато-взвешенная насадка; 2 - $\Delta P_{ТФ}$ – трубчато-фонтанирующая насадка

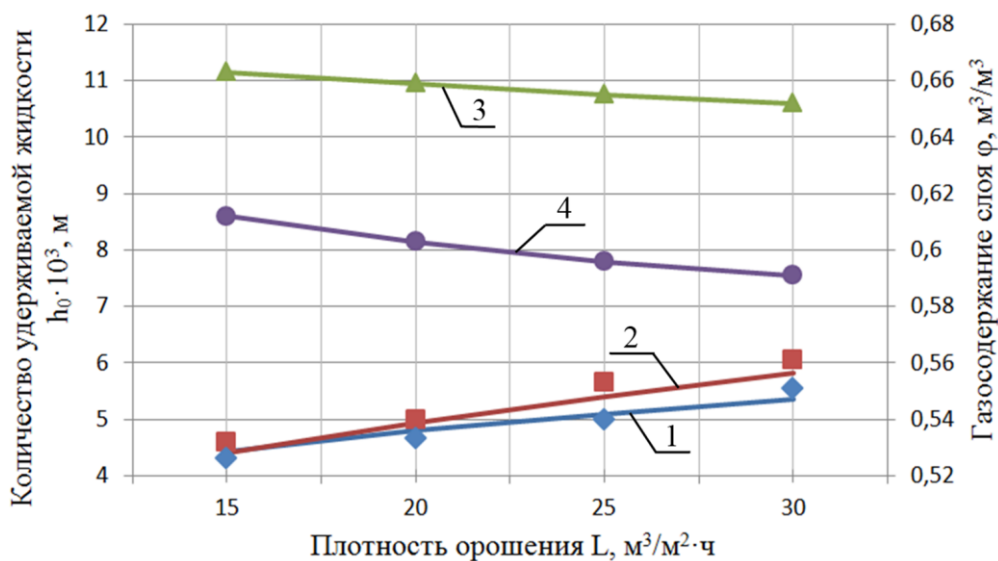
Рисунок 2.18 – Зависимость гидравлического сопротивления аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой от плотности орошения



Условия опытов см. рисунок 2.17; $L=15 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$

1 и 3 - $h_0^{ТВ}$ и $\varphi_{ТВ}$ – трубчато-взвешенная насадка; 2 и 4 - $h_0^{ТФ}$ и $\varphi_{ТФ}$ – трубчато-фонтанирующая насадка

Рисунок 2.19 – Зависимость количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой от скорости газа



Условия опытов см. рисунок 2.17; $w_g = 4 \text{ м/с}$

1 и 3 - $h_0^{ТВ}$ и $\varphi_{ТВ}$ – трубчато-взвешенная насадка; 2 и 4 - $h_0^{ТФ}$ и $\varphi_{ТФ}$ – трубчато-фонтанирующая насадка

Рисунок 2.20 – Зависимость количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой от плотности орошения

Как видно из рисунков 2.17 и 2.19 с увеличением скорости газового потока гидравлическое сопротивление и количество удерживаемой жидкости аппаратов с трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей насадкой растут. Известно, что рост гидравлического сопротивления при увеличении скорости газа обусловлен ростом динамического напора. В связи с этим энергетические затраты на преодоление контактной зоны аппаратов растут. Увеличение динамического напора способствует также удержанию большего количества жидкости в объеме насадки (рисунок 2.19).

Сопоставление данных гидравлического сопротивления аппаратов с трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей насадкой (рисунок 2.17) показывают, что данные для трубчато-фонтанирующей насадки практически в 3 раза превосходят данные трубчато-взвешенной насадки. Это связано с установкой пирамидальной решетки перекрывающей свободное сечение аппарата в 3,57 раза. Кроме того, при работе аппарата с трубчато-взвешенной насадкой создаются условия для факельного прорыва газа без взвешивания шаровых насадочных элементов.

Количество удерживаемой жидкости в исследуемых аппаратах (рисунок 2.19) имеет свои особенности. Как видно из приведенных выше фотографий, фонтанирование шаровых элементов в аппарате с трубчато-фонтанирующей насадкой происходит во всем диапазоне изменения скорости газа, тогда как в аппарате с трубчато-взвешенной насадкой взвешивание шаров наблюдается только при повышенных скоростях газа (4-5 м/с). Поэтому в диапазоне скоростей газа от 1 до 3 м/с показатели количества удерживаемой жидкости в аппарате с трубчато-фонтанирующей насадкой превышают аналогичные показатели для аппарата с трубчато-взвешенной насадкой. Интенсивное взвешивание шаровой насадки при скоростях газа 4-5 м/с приводит к тому, что показатели количества удерживаемой жидкости в аппарате с трубчато-взвешенной насадкой становятся больше, чем в аппарате с трубчато-фонтанирующей насадкой.

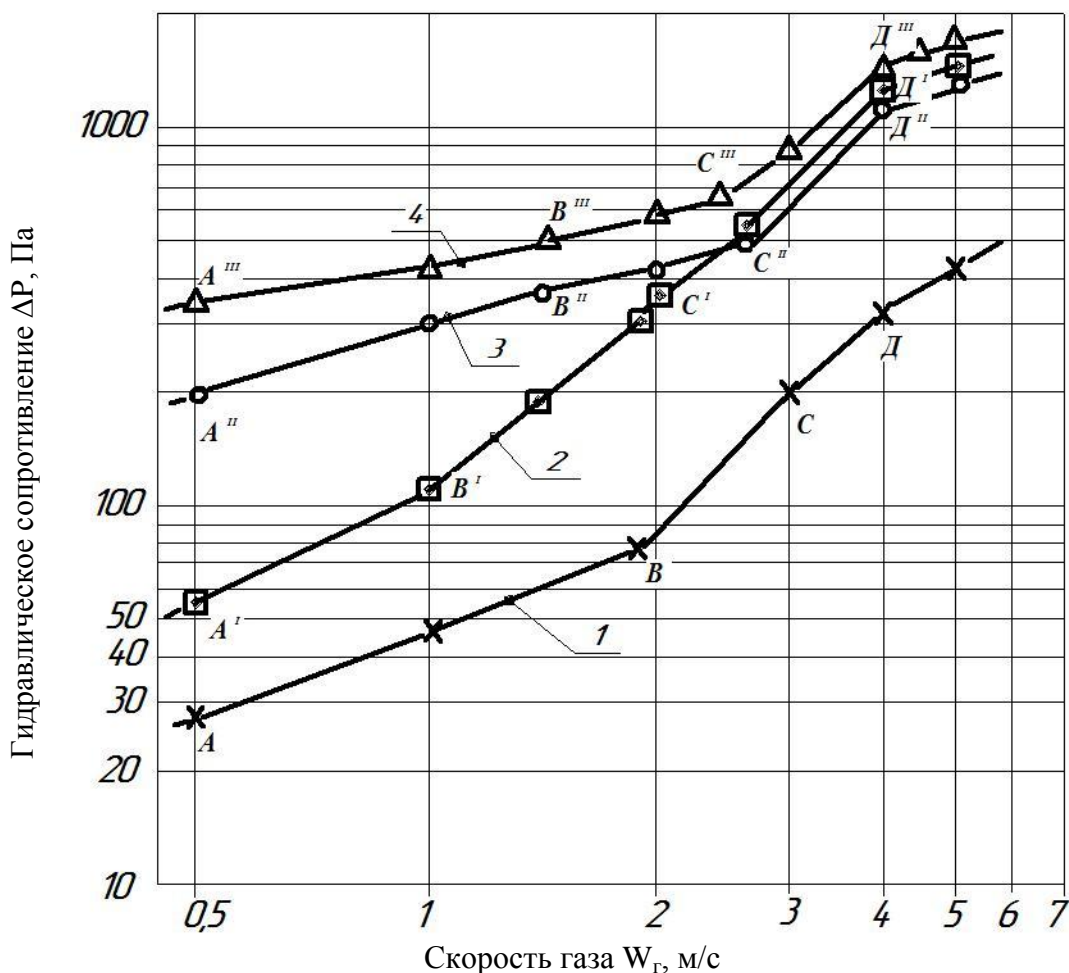
Расчетные данные по газосодержанию слоя (рисунок 2.19) показывают, что с увеличением скорости газа значения показателей для двух исследуемых аппаратов растут, и их рост несколько замедляется при повышенных скоростях газа (4-5 м/с).

Увеличение плотности орошения (рисунки 2.18 и 2.20) приводит к росту гидравлического сопротивления и количества удерживаемой жидкости. Это очевидно, так как в процессе перемешивания участвует большее количество жидкости.

Расчетные данные газосодержания слоя при изменении плотности орошения (рисунок 2.20) показывают превышение показателей для аппарата с трубчато-взвешенной насадкой. Это очевидно, так как в одинаковых объемах контактной зоны, в аппарате с трубчато-взвешенной насадкой удерживается меньшее количество жидкости.

На рисунке 2.21 представлен график зависимости гидравлического сопротивления от скорости газового потока в логарифмической сетке

координат для аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой (ТВ и ТФ) [64], а также аппаратов со взвешенной (ВН) и фонтанирующей насадкой (ФН) [21 с.125], [65,66]. Известно, что построение графиков в логарифмической сетке координат позволяет получить ломанные кривые. Это удобно, например, для выявления границ существования режимов работы аппаратов.



Условия опытов: аппараты ТВ и ТФ (одна опорно-распределительная решетка; $\rho_H = 600 \text{ кг/м}^3$; $d_H = 0,015 \text{ м}$; $H_{ст} = 0,03 \text{ м}$; $S_K/S_{ан} = 0,28 \text{ м}^2/\text{м}^2$; $L = 15 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$); аппараты ВН и ФН ($S_o = 0,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$; $H_{ст} = 0,2 \text{ м}$; $\rho_H = 650 \text{ кг/м}^3$; $d_H = 0,04 \text{ м}$; $\alpha = 60^\circ$; $L_o = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$) [21 с.125]

1 - $\Delta P_{ТВ}$ – трубчато-взвешенная насадка; 2 - $\Delta P_{ТФ}$ – трубчато-фонтанирующая насадка; 3 - $\Delta P_{ВН}$ – аппарат ВН; 4 - $\Delta P_{ФН}$ – аппарат ФН

Рисунок 2.21 – Зависимость гидравлического сопротивления аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой, ВН и ФН от скорости газа

Как видно из рисунка 2.21 участки АВ, А^IВ^I, А^{II}В^{II} и А^{III}В^{III} соответствуют неподвижному состоянию слоя насадки в аппаратах ТВ, ТФ, ФН и ВН. Такой режим называется режимом стационарного состояния насадки. Существование этого режима для аппарата ФН в более узком диапазоне w_r связано с наличием в нем конусной тарелки, которая способствует увеличенной скорости

вводимого газового потока в центральной части слоя, где насадка начинает приобретать подвижность.

При повышении скорости газа, вводимого в слой орошаемой насадки, свободно всплывающие пузырьки сливаются в струи, одновременно происходит накопление жидкости в слое насадки, приводящее к запиранию каналов, и отвод поступающего газа становится возможным только при деформации слоя насадки. Это состояние соответствует началу взвешивания слоя $w_{H, B}$. [21 с.125].

При $w_r \geq w_{H, B}$ подъемная сила в аппарате ВН и ТВ становится достаточной для отрыва элементов насадки от решетки. С ростом w_r увеличивается число взвешенных элементов по всему сечению, причем взвешивание в аппаратах ВН и ТВ носит неравномерный пульсационный характер. Этот неустойчивый режим называется переходным. На рисунке 2.21 ему соответствуют участки BC , $B^I C^I$ и $B^{III} C^{III}$.

Особенности переходного режима (участок $A^I I^I$) в аппарате ФН заключаются в следующем. Над центральной частью решетки образуется полость, состоящая из газожидкостной смеси и отдельных взвешенных элементов насадки. С увеличением w_r полость поднимается вверх и при достижении верхнего уровня разрушается. При этом, как и в двухфазном фонтанирующем слое образуется «шапка» фонтанирующего слоя, состоящая из взвешенных элементов насадки и брызг. Эта стадия носит название начального фонтанирования, она наблюдается до $w_r = 2$ м/с и характеризуется тем, что концентрация насадки в ядре меньше, чем в периферийной зоне. Вследствие захватывания насадки газовым потоком разрушается периферийная зона, т. е. насадка и жидкость, находящиеся в нижней части, вовлекаются в фонтанирование, на их место сползают другие. Этот процесс сопровождается большими пульсациями давления.

Начало фонтанирования, или взвешивания (переходные точки B , B^I , B^{II} и B^{III}), существенно зависит от плотности орошения L . Увеличение L приводит к изменению $w_{н.ф}$ или $w_{н.в}$ в сторону меньших значений w_r . В переходном режиме рост ΔP в зависимости от w_r несколько замедляется, т. е. $\Delta P \sim w_r^{0,3 \div 0,5}$. Это объясняется пульсационным характером поведения слоя, жидкость проваливается через решетку большими порциями и как следствие, уменьшается ее задержка [21 с.126].

В пределах участков CD , $C^I D^I$, $C^{II} D^{II}$, $C^{III} D^{III}$ и $C^{IV} D^{IV}$ в каждом из аппаратов ПН наблюдается интенсивное турбулентное взаимодействие фаз. Поэтому режим называется режимом развитой турбулентности и характеризуется интенсивным движением насадки, значительным расширением слоя и заметной равномерностью распределения фаз.

При достижении скорости газа $\sim 2,0$ м/с в аппарате ФН наступает развитое фонтанирование насадки. Эта стадия продолжается до $w_r \sim 3,0$ м/с. С увеличением w_r от 3,0 до 5,0 м/с достигается равномерное распределение насадки по высоте ядра фонтанирующего слоя.

Предельная скорость газа в противоточных аппаратах ПН ограничена величиной допустимого брызгоуноса (при отсутствии каплеуловителя) или прижатием части насадки к верхней решетке с образованием висячего плотного слоя, что приводит к резкому скачку гидравлического сопротивления аппарата. Этот режим назван режимом брызгоуноса.

2.4 Расчет гидродинамических параметров

2.4.1 Гидравлическое сопротивление

Гидравлическое сопротивление аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой складывается из сопротивления трубчатого пучка и шаровой взвешенной насадки [64]:

$$\Delta P_L = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{ПН}} \quad (2.31)$$

Потери напора потока, затрачиваемые на образование и взаимодействие вихрей в трубчатом пучке аппарата, на изменение направления газового потока, на трение газа о поверхность трубчатых элементов и пленку жидкости могут быть вычислены по следующей зависимости [67-71]:

$$\Delta P_L = \xi_L \cdot \frac{H}{t_b} \cdot \frac{\rho_{\text{г}} W_{\text{г}}^2}{2 \varepsilon_{\text{мп}}^2}, \quad (2.32)$$

где H - высота насадки, м; $\rho_{\text{г}}$ - плотность газа, кг/м³; ξ_L - коэффициент сопротивления, учитывающий потери давления при взаимодействии вихрей в вертикальном и радиальном направлениях, на трение газа о поверхность насадочных элементов и пленку жидкости; $\varepsilon_{\text{тр}}$ - порозность ряда трубчатой насадки.

Обработкой экспериментальных данных ΔP_L [45,51,67] получены практически идентичные расчетные зависимости для определения коэффициентов ξ_L :

$$\xi_L = 0,53 \cdot \theta_{\text{г}} \cdot \theta_{\text{п}} \cdot \text{Re}_{\text{ж}}^{0,1} \quad (2.33)$$

В формуле (2.33) $\text{Re}_{\text{ж}}$ – число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{U_{\text{ж}} \cdot d_{\text{экв}}}{\nu_{\text{ж}}}, \quad (2.34)$$

где $U_{\text{ж}} = L/3600$ - скорость жидкости, м/с; $\nu_{\text{ж}}$ - коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с; L - плотность орошения, м³/м²·ч; $d_{\text{экв}}$ - эквивалентный диаметр насадки, м.

Коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в вертикальном направлении для всех видов насадочных элементов $\theta_{\text{В}}$ [45,51]:

$$\theta_e = 0,85 + 0,15 \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{4t_e \cdot Sl}{m_k} + 1 \right) \right], \quad (2.35)$$

где Sl - число Струхала для трубчатых элементов $Sl = 0,2$; m_k - параметр, учитывающий вихреобразования, форму обтекаемых элементов и снижение скорости вихрей. Для трубчатых элементов

$$m_k = 0,44(1 - \exp(-t_e)) \quad (2.36)$$

Коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в радиальном направлении и учитывающий изменение частоты вихреобразования, θ_p может быть определен по формуле (2.73).

Гидравлическое сопротивление взвешенного слоя орошаемой шаровой насадки складывается из сопротивления шаров и задерживаемой ими жидкости:

$$\Delta P_{ПН} = (1 - \varepsilon_{ш}) \cdot \rho_n \cdot g \cdot H_{ст} + \kappa_s \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot h_{ж} \quad (2.37)$$

где κ_s - корректирующий коэффициент. Для аппарата с трубчато-взвешенной насадкой $\kappa_s = 0,558$; для аппарата с трубчато-фонтанирующей насадкой $\kappa_s = 0,65 \cdot S_{ап}/S_k$; $h_{ж}$ - количество жидкости удерживаемой взвешенной шаровой насадкой.

2.4.2 Количество удерживаемой жидкости и газосодержание слоя

Для расчета количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя предложены следующие расчетные уравнения.

Для аппарата ВН [3 с.47]:

$$Fr = \frac{\rho_{г} \cdot W_{г}^2}{\rho_{ж} g h_{ж}} = x \left(\frac{W_{г}}{W_{ж}} \right)^z \cdot \left(\frac{H_{ст}}{d_n} \right)^{-0,25} \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right)^{0,1} \cdot S_0^{0,2}, \quad (2.38)$$

где $\rho_{г}$ и $\rho_{ж}$ - плотность газа и жидкости, кг/м^3 ; $h_{ж}$ - высота слоя жидкости, м; $H_{ст}$ - статическая высота слоя насадки, м; d_n - диаметр насадки (шаров), м; ρ_n - плотность материала насадки, кг/м^3 ; S_0 - свободное сечение опорно-распределительной решетки, $\text{м}^2/\text{м}^2$. При $W_{г} > 3,0 \text{ м/с}$ $x = 0,017$, $z = 0,29$.

В аппарате с регулярно-взвешенной насадкой [72] свободное сечение опорно-распределительной решетки более $0,9 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Тогда $S_0^{0,2} \rightarrow 1$.

Критерий Фруда для аппарата с регулярно-взвешенной насадкой:

$$Fr = A \left(\frac{W_{г}}{W_{ж}} \right)^{0,29} \cdot \left(\frac{H_{ст}}{d_n} \right)^{-0,25} \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right)^{0,1}, \quad (2.39)$$

где $A=0,0084$ - опытный коэффициент.

С учетом (2.39) из уравнения (2.38) можно определить количество жидкости удерживаемой взвешенной шаровой насадкой:

$$h_{ж} = \frac{\rho_{г} \cdot W_{г}^2}{\rho_{ж} \cdot g \cdot F \cdot r} \quad (2.40)$$

Газосодержание газожидкостного слоя [26 с.30]:

$$\varphi_{ВН} = \frac{W_{г}}{0,043 \sqrt{\frac{g}{\rho_{г}} [\rho_{ж} h_{ж} + (1 - \varepsilon_{ш}) \rho_{н} H_{СТ}] + W_{г}}} \quad (2.41)$$

Количество удерживаемой жидкости (КУЖ) в аппарате с регулярной трубчатой насадкой определяется по формуле [52 с.76]:

$$h_0^{mp} = 0,54 \cdot \xi_L \cdot \frac{H}{t_{г}} \cdot \frac{\rho_{г} W_{г}^2}{2 \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot \varepsilon_{mp}^2}, \quad (2.42)$$

где H - высота насадки, м; $\rho_{г}$ - плотность газа, кг/м³; ξ_L - коэффициент сопротивления, учитывающий потери давления при взаимодействии вихрей в вертикальном и радиальном направлениях, на трение газа о поверхность насадочных элементов и пленку жидкости; $\varepsilon_{тр}$ порозность ряда насадки:

$$\varepsilon_{тр} = 1 - \frac{d}{t_p} \quad (2.43)$$

Входящий в уравнение (2.42) коэффициент сопротивления ξ_L определяется по формуле (2.33).

Коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в вертикальном направлении для всех видов насадочных элементов $\theta_{в}$ определяется по уравнению (2.35).

Коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в радиальном направлении и учитывающий изменение частоты вихреобразования, θ_p определяется по формуле (2.70).

Газосодержание слоя определим расчетным путем [73,74]:

$$\varphi_{mp} = \varepsilon - \frac{h_0}{H} \quad (2.45)$$

Количество удерживаемой жидкости в аппарате с трубчато-взвешенной насадкой определим по формуле [72]:

$$h_0^{общ} = h_0^{ТВ} + h_0^{тр} \quad (2.46)$$

Газосодержание слоя в аппарате с трубчато-взвешенной насадкой рассчитываем по формуле [72]:

$$\varphi_{\text{общ}} = \varphi_{\text{тр}} \cdot \varphi_{\text{ТВ}} \quad (2.47)$$

Для аппарата ФН [3 с.47]:

$$Fr = x \left(\frac{W_{\Gamma}}{W_{\text{ж}}} \right)^z \cdot \left(\frac{H_{\text{СТ}}}{d_{\text{н}}} \right)^{-0,25} \left(\frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,1} \cdot \left(tg \frac{\alpha}{2} \right)^{0,15} \cdot S_0^{0,25} \quad (2.48)$$

при $W_{\Gamma} > 3,0$ м/с $x=0,017$, $z = 0,43$. В аппарате с регулярно-взвешенной насадкой свободное сечение опорно-распределительной решетки более $0,9$ м²/м². Тогда $S_0^{0,2} \rightarrow 1$.

Критерий Фруда для аппарата с трубчато-фонтанирующей насадкой:

$$Fr = 0,017 \left(\frac{W_{\Gamma}}{W_{\text{ж}}} \right)^{0,43} \cdot \left(\frac{H_{\text{СТ}}}{d_{\text{н}}} \right)^{-0,25} \left(\frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,1} \cdot \left(tg \frac{\alpha}{2} \right)^{0,15}, \quad (2.49)$$

где $A=0,0033$ – опытный коэффициент.

Количество жидкости удерживаемой взвешенной шаровой насадкой определяем по уравнению (2.40).

Газосодержание газожидкостного слоя (ФН) [26 с.35]:

$$\varphi_{\text{ФН}} = \frac{W_{\Gamma}}{0,065 \sqrt{\frac{g}{\rho_{\Gamma}} [\rho_{\text{ж}} h_{\text{ж}} + (1-\varepsilon_0) \rho_{\text{н}} H_{\text{СТ}}] + W_{\Gamma}}} \quad (2.50)$$

Количество удерживаемой жидкости в аппарате с трубчато - фонтанирующей насадкой определим по формуле:

$$h_0^{\text{общ}} = h_0^{\text{ТФ}} + h_0^{\text{ТР}} \quad (2.51)$$

Газосодержание слоя в аппарате с трубчато - фонтанирующей насадкой рассчитываем по формуле:

$$\varphi_{\text{общ}} = \varphi_{\text{тр}} \cdot \varphi_{\text{ТФ}} \quad (2.52)$$

2.4.3 Структурные составляющие газожидкостного слоя

При скоростях газового потока от 1 до 3 м/с жидкость в контактной зоне аппаратов с трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей насадкой в основном находится в виде капель, тогда как при скоростях 4-5 м/с в газожидкостном слое преобладают пузырьки газа [75].

Определим средние диаметры капель и пызырьков [76].

Средний диаметр капель жидкости. Фотографии и визуальная картина образования капель вблизи трубчатых элементов и движущихся шаров

свидетельствуют об образовании практически одинаковых по размеру капель жидкости. Как можно было проследить при статистической обработке фотографий, образование капель протекает по следующему механизму. Поступающая на орошение жидкость попадает на насадочные элементы и образует на них пленку жидкости. Пленка жидкости стекает с элементов насадки с образованием струек. Образующиеся за насадочными элементами вихри дробят струйки жидкости на капли.

Определим диаметр капель за трубчатыми насадочными элементами и будем считать их как среднюю величину всего насадочного слоя.

Образование и дробление капель жидкости в объеме насадочного слоя носит сложный характер [77-79]. Дробление может произойти как из-за деформации капель, так и под действием удара движущихся с большой скоростью капель о насадку и между собой. Имеет место прилипание капель к насадке и коалесценция частиц жидкости. Такая постоянная и многократная смена актов дробления и слияния приводит к выравниванию размеров капель. Поэтому оценка зависимости среднеинтегрального значения диаметра капель от основных параметров слоя представляет интерес для расчетных уравнений.

Механизм дробления капель в сплошном потоке объясняется [78,80,81] исходя из теории локальной изотропной турбулентности. Мелкомасштабные пульсации $l \ll d_k$ на каплю, движущуюся в газовом потоке с плотностью $\rho_{\Gamma} \ll \rho_{ж}$, не способны оказать влияние даже на характер ее движения. Крупномасштабные пульсации сравнительно мало изменяются на расстоянии порядка размера капли. Следовательно, на нее могут результативно воздействовать, вызывать деформацию формы или дробление, только пульсации с масштабом $l \sim d_k$. Считается [78], что размеры капель, дробящихся в турбулентном потоке, при $d_k \gg l_0$ не должны зависеть от вязкостных свойств сплошной и дисперсной сред.

Принимаем следующие допущения: образование капель происходит при дроблении пленки под действием вихрей, возникающих при обтекании элементов насадки, вдали от пристенных слоев сплошной среды; капли в момент формирования имеют сферическую форму с однородным поверхностным натяжением; скорости дробления и коалесценции капель одинаковы. Последнее допущение справедливо при последовательном и многократном дроблении образующейся пленки.

При определении размера капли исходим из условия равновесия сил, действующих на каплю [44 с.88], [51,52 с.82]:

$$\rho_{ж} (\bar{U}')^2 / 2 = 4\sigma / d_k, \quad (2.53)$$

где в левой части уравнения – динамический напор, действующий изнутри на поверхность раздела, обусловленный изменением пульсационных скоростей на расстоянии $l = d_k$, а в правой части – капиллярное давление.

Среднюю пульсационную скорость можно выразить согласно закона "двух-третей" следующим образом:

$$\bar{U}' = \mathfrak{E}^{1/3} \cdot l^{1/3} = \mathfrak{E}^{1/3} \cdot d^{1/3}, \quad (2.54)$$

где l – масштаб пульсаций, сравниваемый с диаметром капли, т.е. $l \sim d_k$.

Диссипацию энергии в массе жидкости определим по формуле:

$$\mathfrak{E} = \frac{N_\varepsilon}{V_{жс} \cdot \rho_{жс}}, \quad (2.55)$$

где N_ε - мощность вихрей, образующихся при обтекании цилиндрических труб:

$$N_\varepsilon = \xi_L \cdot S_n \cdot \rho_2 \cdot \frac{U_2^3}{2}. \quad (2.56)$$

Здесь ξ_L - коэффициент гидравлического сопротивления; $U_2 = W_2 / \varepsilon_{mp}$ – истинная скорость, м/с.

Объем жидкости на поверхности труб:

$$V_{жс} = S_n \cdot \delta_{пл}, \quad (2.57)$$

где толщина пленки $\delta_{пл}$ [52 с.79]:

$$\delta_{пл} = 1,15 \cdot \left(\frac{U_{жс} \cdot d \cdot \nu_{жс}}{g} \right)^{1/3}, \quad (2.58)$$

Подставляя выражение (2.54) с учетом (2.55)-(2.57) в уравнение (2.53) и решая относительно d_k , получим:

$$d_k = 0,067 \cdot \xi_L^{1/3} \cdot \frac{\rho_{жс}^{1/6} \cdot \sigma^{1/3} \cdot d_{cmp}^{2/3} \cdot U_\Gamma}{\rho_\Gamma^{1/2} \cdot U_{cmp}^{5/3}} \quad (2.59)$$

В уравнении (2.59) значения величин для диаметра струй d_{cmp} и скорости движения струй U_{cmp} определяются по формулам [52 с.81,82]:

$$d_{cmp} = \frac{9,5}{\xi_L^{2/5}} \cdot \frac{\sigma^{3/5} \cdot \delta_{пл}^{2/5}}{\rho_{жс}^{1/5} \cdot \rho_2^{2/5} \cdot u_2^{6/5}} \quad (2.60)$$

$$U_{cmp} = 1,28 \frac{\sigma^{1/2}}{\rho_2^{1/3} \cdot \rho_{жс}^{1/6} \cdot d_{cmp}^{1/2}} \quad (2.61)$$

Степени при членах уравнения (2.44) соответствуют диапазону степеней, полученных ранее различными авторами [78,80]. Это подтверждает то, что полученное уравнение практически полностью отражает характер влияния на размер капель параметров турбулентного потока.

Средний диаметр пузырьков газа. К одной из сложных проблем механики газа и жидкости относится устойчивость формы и движения газовых пузырьков. Среди предложенных механизмов изменения деформационной турбулентности в зависимости от режимов движения частиц наиболее обоснованным представляется механизм, предложенный Х. Брауэром [82]. В нем, исходя из классической зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса, различают три стадии изменения формы пузырька:

1. Область движения шарообразных пузырей

$$0 \leq Re_{\pi} \leq Re_1;$$

2. Переходная область с периодической деформацией формы пузыря

$$Re_1 \leq Re_{\pi} \leq Re_2;$$

3. Область стохастического изменения формы пузыря

$$Re_{\pi} \geq Re_2.$$

Для определения граничных условий предложены [82]:

$$Re_1 = 3.73 \cdot K_{\phi}^{0.209}; \quad (2.62)$$

$$Re_2 = 3.1 \cdot K_{\phi}^{0.26}; \quad (2.63)$$

$$K_{\phi} = \frac{\rho_{\text{ж}} \sigma^3}{g \mu^4} = \frac{\sigma^3}{g v_{\text{ж}}^4 \rho_{\text{ж}}^3}. \quad (2.64)$$

В этих зависимостях: $Re_{\pi} = \frac{W_{\pi} \cdot d_{\pi}}{v_{\text{ж}}}$ - число Рейнольдса для пузыря, движущегося в слое жидкости; $Re_1 = 666$ и $Re_2 = 1530$ - критерии Рейнольдса, определяющие режимы движения пузырька; K_{ϕ} - безразмерное число, названное нами коэффициентом формы, учитывающее влияние поверхностных и вязкостных сил на форму пузыря.

Проведенные уточненные расчеты по известным экспериментальным данным [80,83-85] показали, что

$$Re_1 = 4 \cdot K_{\phi}^{0.2}; \quad (2.65)$$

$$Re_2 = 3.44 \cdot K_{\phi}^{0.25}. \quad (2.66)$$

Для каждой из трех стадий движения пузырька на основе визуальных наблюдений в работе Х. Брауэра [82] дается описание деформаций пузырька, но при этом нет оценки устойчивости пузырька.

Такая оценка дана в работе [86 с.10] при исследовании аппарата с крупнодырчатыми перфорированными тарелками.

Для области движения шарообразных пузырьков на основе работ Прандтля и Левича получено уравнение для расчета диаметра пузырька [86 с.65]:

$$d_{\pi} = \frac{8\sigma}{\zeta_{\pi} \rho_{ж} W_{\pi}^2}. \quad (2.67)$$

Здесь W_{π} скорость вынужденного всплытия пузырька равна:

$$W_{\pi} = \frac{W_{к}}{\varphi} + \left(\frac{U}{1-\varphi} \right). \quad (2.68)$$

Отмечено [86 с.65], что в области малых относительных скоростей, устойчивый пузырь имеет сравнительно большой размер. Но для этих пузырей основной силой, которая изменяет его форму, является разность гидростатических давлений.

В переходной области с периодической деформацией формы пузырька ($660 \leq Re_{\pi} \leq 1530$) исходная сферическая форма изменяется от эллиптической до грибовой [82]. Отличительной особенностью этого режима является резкое повышение коэффициента гидравлического сопротивления пузыря от 0.09 до 2.61. Х. Брауэр предполагает, что продолжительность жизни завихрений, возникающих из-за деформации, значительно выше, чем период изменения формы, т.е. новые вихри, могут взаимодействовать с предыдущими. Этим можно объяснить резкий скачок ζ_{π} . Аналогичный закон изменения коэффициента сопротивления наблюдается и для капель [83].

В этом режиме для определения диаметра пузырька можно воспользоваться уравнением (2.70) [86 с.66].

Область стохастического изменения формы пузырька $Re_{\pi} \geq 1530$ Х. Брауэр [82] охарактеризовал как область бесформенных или формодинамических пузырьков. Наиболее интересным представляется постоянство их коэффициента сопротивления $\zeta_{\pi} = 2.61$ при $Re_{\pi} > 1530$. Такое явление можно объяснить закономерностями движения пузырьков малой величины и их пульсациями, вследствие чего образуемые вихри турбулизуют пограничный слой жидкости. Поэтому эту область можно назвать режимом движения пульсирующего изменения формы газового пузырька. Причем изменение может быть локальным, а не всей поверхности. Поэтому она в целом близка к сферической [86 с.66].

Для этой области получено следующее расчетное уравнение [76,85 с.67]:

$$d_{\pi} = 3.44 \frac{\sigma^{3/4}}{g^{1/4} \rho_{ж}^{3/4} W_{\pi}}. \quad (2.69)$$

2.4.4 Частотные характеристики газожидкостного слоя

Анализ литературных данных по обтеканию двух цилиндров, расположенных рядом [44 с.59], показал, что при расстояниях менее $2d$ в зазоре между ними частота срыва вихрей больше, чем та, которая получена для одиночно обтекаемых тел. С уменьшением зазора частота растет. Следовательно, ширина зазора определяет частоту срыва вихрей. В этом случае рост силы сопротивления и подъемной силы обусловлен значительными затратами энергии потока за счет увеличения числа образующихся вихрей в единицу времени.

При достижении некоторого критического расстояния между обтекаемыми телами параметром, определяющим частоту срыва вихрей, становится ширина обтекаемых тел, а сила сопротивления и подъемная сила снижаются. Дальнейшее увеличение расстояния приводит к незначительному снижению действующих на тела сил.

Согласно [5] импульсные элементы, расположенные в одном ряду перпендикулярно к обтекаемому потоку, способствуют формированию вихрей с масштабами λ . Существуют два случая для дискретно расположенных тел в одном ряду, перпендикулярному обтекаемому потоку:

1 случай при $t_p > 2d$ $\lambda = d$;

2 случай при $t_p < 2d$ $\lambda = t_p - d$.

Из условия взаимодействия параллельных вихревых струй следует, что коэффициент, характеризующей степень взаимодействия вихрей в радиальном направлении и учитывающий изменение частоты вихреобразования, θ_p может быть определен по формуле:

$$\theta_p = \frac{t_p - \lambda}{t_p - d} \quad (2.70)$$

Аналогичная картина наблюдается при вихреобразовании в отверстиях тарелок тепло- и массообменных аппаратов.

Представленные в литературе данные по пульсационным характеристикам в зависимости от свободного сечения тарелки и размера отверстий были пересчитаны на безразмерный параметр t/d_0 (t – шаг между центрами отверстий; d_0 – диаметр отверстий). Результаты пересчета показывают, что и в этом случае наблюдается некоторый критический размер, $t=2d_0$, разграничивающий два механизма образования вихрей. При $t > 2d_0$ – частота образующихся вихрей характеризуется диаметром (шириной) отверстий, а при $t < d_0$ характерным размером являются перегородки между соседними отверстиями [86 с.68].

Объяснение механизма течения фаз через крупные отверстия видится в обтекании газовым потоком перемычек между ними размером $t - d_0$. При этом согласно известным закономерностям образуются вихри, между которыми возникают зоны низкого давления, куда устремляется жидкость, стекая в виде струйки. Пульсирующий характер движения жидкости объясняется тем, что

при обтекании газом любого тела происходит периодическое образование, а затем и срыв вихрей с его кромки. При обтекании перемычки между отверстиями происходит аналогичное явление. Причем в период, наступающий после срыва вихрей с кромки отверстия до полного образования следующего вихря, жидкость истекает. Таким образом, можно быть уверенным, что частота срыва вихря f_v и частота истечения струи жидкости f_c равны [86 с.68].

Определим частотные параметры потоков [87]. Учитывая, что струи жидкости, образующиеся при стекании пленки с поверхности трубчатых элементов приобретают пульсационное (колебательное) движение, можно воспользоваться известными оценками для волнового течения:

$$f_c \approx \bar{U}k = \bar{U} \cdot \frac{2\pi}{\ell}, \quad (2.71)$$

где \bar{U} - среднеквадратичная пульсационная скорость; k - волновое число; ℓ - масштаб волны.

Для случая истечения свободной струи жидкости в поток легкой среды с $\rho_r \ll \rho_{ж}$ можно допустить, что $\bar{U} \approx U_{стр}$; $\ell \approx d_{стр}$. Тогда из (2.71) получим следующую оценку для скорости истечения струи:

$$f_c = U_{стр} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{d_{стр}} \quad (2.72)$$

Частоту срыва вихрей, возникающих при обтекании трубчатых элементов, определим с учетом числа Струхаля:

$$f_a = \frac{W_z}{\varepsilon_{мп} \cdot Sl \cdot d_{стр}}, \quad (2.73)$$

где $W_z / \varepsilon_{мп}$ - скорость газа при прохождении трубчатого пучка.

Из постановки задачи следует, что $f_c = f_a$. Тогда

$$Sl = \frac{W_z}{u_{стр} \cdot 2\pi \cdot \varepsilon_{мп}} \quad (2.74)$$

Таким образом, нами получена частотная характеристика, связывающая частоту истечения струи жидкости при распаде пленки жидкости стекающей с трубчатого элемента с частотой срыва вихря, возникающего при обтекании трубы. Данное выражение может быть использовано при определении эффективности массообмена в следующем виде:

$$\psi_6 = \frac{W_z}{u_{стр} \cdot 2\pi \cdot \varepsilon_{мп}} \quad (2.75)$$

3 ТЕПЛОМАССОБМЕН В АППАРАТЕ С КОМБИНИРОВАННОЙ РЕГУЛЯРНО-ВЗВЕШЕННОЙ НАСАДКОЙ

3.1 Массо - и теплообменные характеристики аппарата

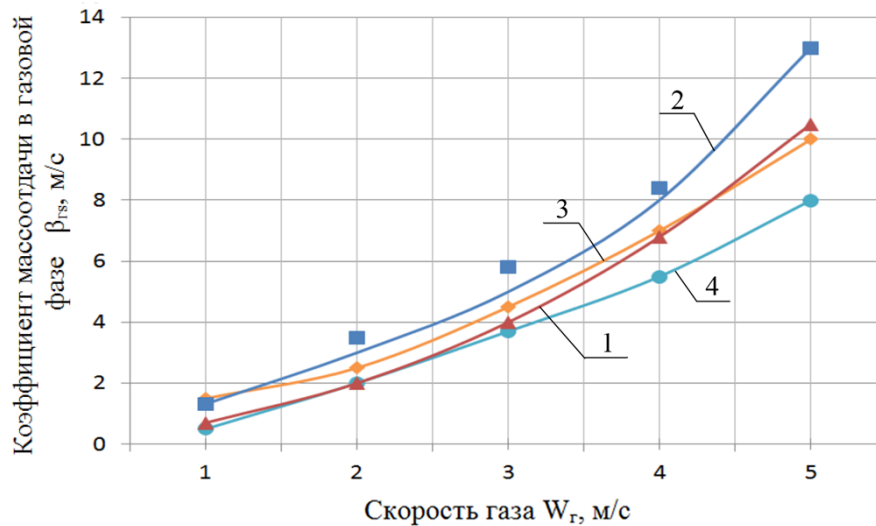
Как видно из предыдущего раздела, основным из факторов, влияющим на частоту пульсаций потока, является его скорость. Рассмотрим влияние скорости газового потока на коэффициенты массоотдачи в газовой фазе $\beta_{гс}$ и теплоотдачи α .

На рисунке 3.1 представлен график зависимости коэффициентов массоотдачи в газовой фазе, а на рисунке 3.3 график зависимости коэффициентов теплоотдачи аппаратов с подвижной насадкой от скорости газа [88]. Анализ этих кривых показывает, что интенсивность массообмена растет с увеличением скорости газового потока. Это, очевидно, так как в случае массообмена, лимитируемого сопротивлением газовой фазы, при повышении скорости газа происходит значительная турбулизация потоков, что снижает диффузионное сопротивление. При этом претерпевает изменение и структура газожидкостного слоя, снижается средний диаметр капель, а следовательно, растет межфазная турбулентность. Увеличение скорости газового потока приводит к росту коэффициентов теплоотдачи (рисунок 3.3). Это происходит из-за возрастания разности температур по поверхности контакта.

Процесс образования, движения и взаимодействия вихрей за трубами трубчатого пучка с частотой, увеличивающейся с ростом скорости газа, вносит большой вклад в развитие турбулентности газожидкостного потока. Вместе с тем, движение дискретных насадочных элементов также способствует дальнейшему росту коэффициентов массоотдачи $\beta_{гс}$ и теплоотдачи α .

При изучении гидродинамических характеристик аппаратов с комбинированной трубчато-взвешенной насадкой в исследуемом диапазоне скоростей газового потока и плотностей орошения, было установлено, что до 3м/с в аппаратах сплошным потоком является газ, а жидкость находится в дисперсном состоянии. Вихреобразование за насадочными элементами, присущее всем регулярным насадкам, способствует многократному дроблению капель струй и пленок жидкости, создавая при этом развитую межфазную поверхность. Многократное дробление капель приводит к выравниванию распределения концентраций внутри капли и процесс начинается как бы сначала.

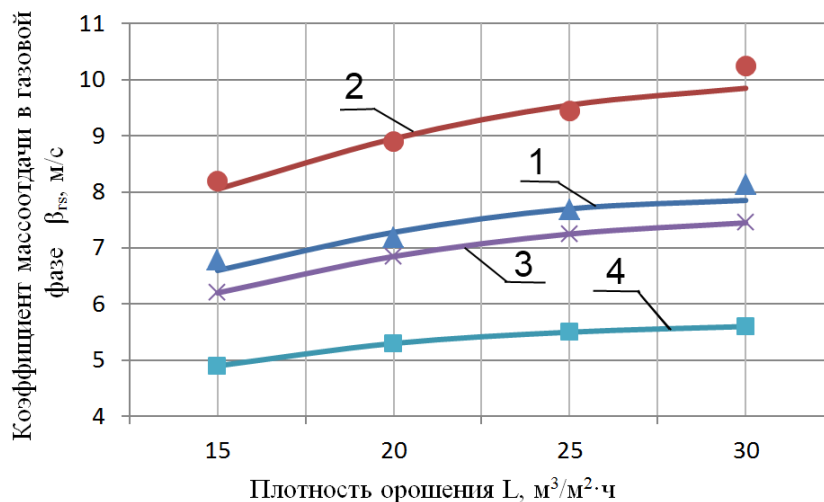
Вихри и движение дискретных насадочных элементов вносят значительный вклад в пульсации газожидкостного слоя, под действием которых появляются колебания свободной поверхности капель жидкости (пузырей), сопровождающееся периодическим изменением их формы. Поэтому частота пульсаций должна определять скорость обновления поверхности раздела, а, следовательно, и скорость массообмена и теплообмена.



Условия опытов: аппараты ТВ и ТФ (одна опорно-распределительная решетка; $\rho_H = 600 \text{ кг/м}^3$; $d_H = 0,015 \text{ м}$; $H_{CT} = 0,03 \text{ м}$; $S_K/S_{ан} = 0,28 \text{ м}^2/\text{м}^2$; $t_B/b = 4$; $t_P/b = 2$; $L = 15 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$); аппараты ВН и ФН ($S_0 = 0,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$; $H_{CT} = 0,2 \text{ м}$; $\rho_H = 650 \text{ кг/м}^3$; $d_H = 0,04 \text{ м}$; $\alpha = 60^\circ$; $L_0 = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$) [21 с.143]

1 - β_{gs} – трубчато-взвешенная насадка; 2 - β_{gs} – трубчато-фонтанирующая насадка; 3 - β_{gs} - взвешенная насадка (ВН) [21 с.143]; 4 - β_{gs} - фонтанирующая насадка (ФН) [21 с.143]

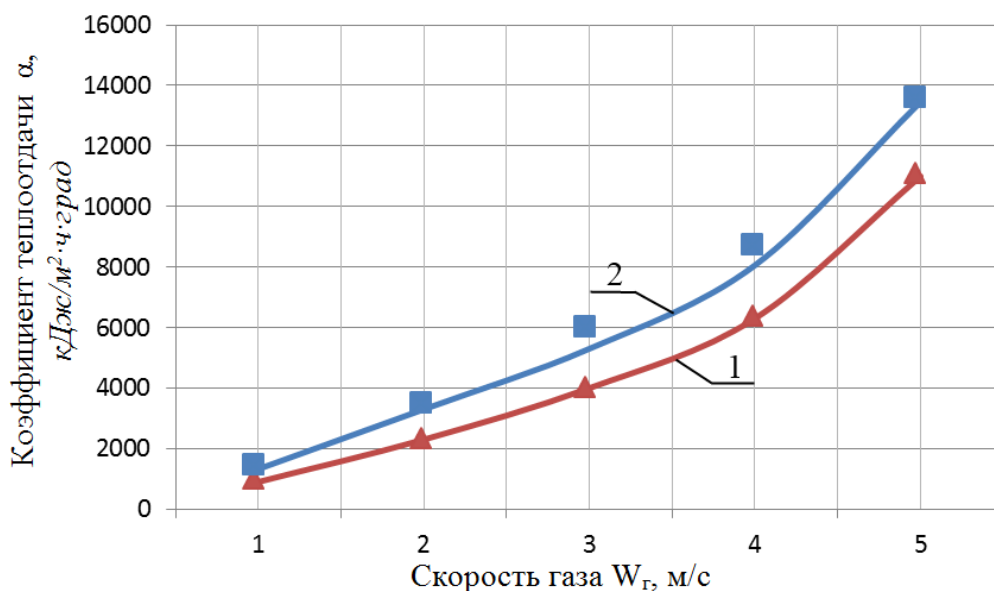
Рисунок 3.1 – Зависимость коэффициентов массоотдачи в газовой фазе аппаратов с подвижной насадкой от скорости газа



Условия опытов см. рисунок 3.1. $w_g = 4 \text{ м/с}$

1 - β_{gs} – трубчато-взвешенная насадка; 2 - β_{gs} – трубчато-фонтанирующая насадка; 3 - β_{gs} - взвешенная насадка (ВН) [21 с.141]; 4 - β_{gs} - фонтанирующая насадка (ФН) [21 с.141]

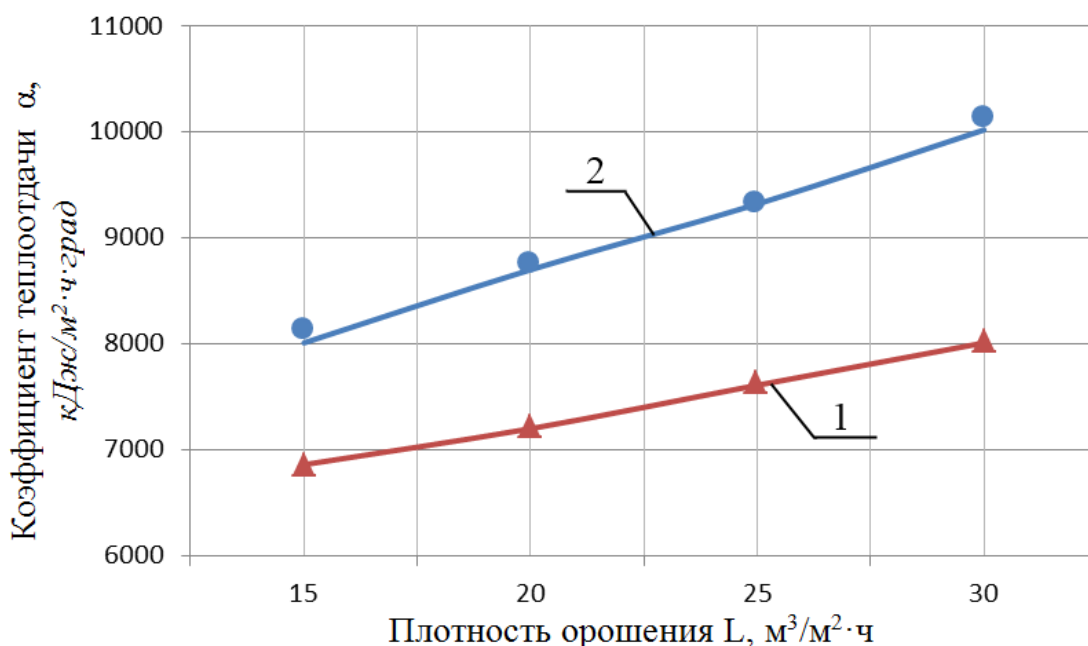
Рисунок 3.2 – Зависимость коэффициентов массоотдачи в газовой фазе аппаратов с подвижной насадкой от плотности орошения



Условия опытов см. рисунок 3.1. $L=15 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$

1 - α – трубчато-взвешенная насадка; 2 - α – трубчато-фонтанирующая насадка

Рисунок 3.3 – Зависимость коэффициентов теплоотдачи аппаратов с подвижной насадкой от скорости газа



Условия опытов см. рисунок 3.1. $w_g = 4 \text{ м/с}$

1 - α – трубчато-взвешенная насадка; 2 - α – трубчато-фонтанирующая насадка

Рисунок 3.4 – Зависимость коэффициентов теплоотдачи аппаратов с подвижной насадкой от плотности орошения

При скоростях газа свыше 3 м/с в аппаратах с трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей насадкой практически во всем объеме контактной зоны наблюдается высокотурбулизированный газожидкостной слой, в котором газ представлен в виде пузырьков. Особенно интенсивно турбулизация потоков

наблюдается в аппарате с трубчато-фонтанирующей насадкой.

В аппаратах ВН и ФН основная доля массообмена приходится на надрешетчатую зону. Интенсивное взаимодействие газа и жидкости происходит как при истечении газовых струй из отверстий решетки, так и в динамическом газожидкостном слое [21 с.143]. Рост β_{rs} в слое при повышении w_r в основном связан с увеличением поверхности контакта фаз в результате усиленного дробления жидкости растущими по масштабу пульсациями, обладающими высокой энергией, что хорошо согласуется с результатами исследований гидродинамики. В аппарате ФН интенсивное взаимодействие газа с жидкостью и её дробление происходит в ядре фонтанирования, которое занимает лишь часть надрешетчатой зоны. Поэтому в нем невелика поверхность контакта фаз и соответственно низки значения β_{rs} .

Данные β_{rs} , полученные для аппаратов ВН и ФН, имеют меньшие значения, чем для аппаратов с комбинированной трубчато-взвешенной насадкой. Это объясняется тем, что в интенсивность массообмена свою долю вклада вносит режим одновременного вихреобразования за регулярно расположенными трубами в трубчатой насадке.

Вместе с тем, внесение в зону трубчатой насадки дискретных шаровых элементов приводит к изменению структуры газожидкостного слоя, связанное с накоплением жидкости и появлению участков, где преобладающее влияние оказывают пузырьки газа. Это не самым положительным образом сказывается на показателях теплообменных характеристик. Результаты исследований β_{rs} и α , полученные для аппарата с регулярной трубчатой насадкой [52 с.98,99] превышают полученные значения для аппаратов с комбинированной трубчато-взвешенной насадкой, особенно в интенсивных режимах работы.

Основным достоинством аппаратов с комбинированной трубчато-взвешенной насадкой является возможность механической очистки внутренних поверхностей контактной зоны от отложений в процессе работы. В этой связи применение таких аппаратов экономически целесообразно, так как позволяет обеспечить бесперебойную работу аппарата при очистке газа, содержащего высоко адгезионные частицы пыли.

Значения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе β_{rs} (рисунок 3.2) и теплоотдачи α (рисунок 3.4) [88] с увеличением плотности орошения L растут. Это связано с увеличением поверхности контакта фаз, которая до 3 м/с определяется поверхностью капель жидкости, рост числа которых с ростом L увеличивается. Увеличение притока свежей жидкости при скорости газа 4 м/с способствует росту числа пузырей участвующих в процессе тепло- и массообмена, увеличению поверхности контакта и, как следствие, росту коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи.

Меньшие значения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе для аппаратов ВН и ФН в сравнении с аппаратами с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой объясняются различными механизмами формирования газожидкостного слоя. Если для аппаратов ВН и ФН формирование газожидкостного слоя в основном осуществляется хаотически движущимися

дискретными насадочными элементами, то в аппаратах с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой газожидкостной слой образуется за счет упорядоченного вихревого взаимодействия потоков газа и жидкости при обтекании трубчатой насадки.

3.2 Расчет тепломассообменных характеристик

Результаты исследований гидродинамических параметров и тепломассообменных характеристик аппаратов с трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей насадкой показали, что значения всех исследуемых параметров для трубчато-фонтанирующей насадки выше. Повышенные значения гидравлического сопротивления для трубчато-фонтанирующей насадки компенсируются более организованной структурой газожидкостного слоя. При этом диапазон рабочих скоростей газа более широк и, если при скоростях газа до 3 м/с движения дискретных насадочных элементов в аппарате с трубчато-взвешенной насадкой не происходит, то в аппарате с трубчато-фонтанирующей насадкой интенсивное движение дискретных контактных элементов начинается при скорости газа 1,5 м/с.

Значения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи в аппарате с трубчато-фонтанирующей насадкой также выше.

В связи с этим для проведения дальнейших исследований и получения расчетных зависимостей мы выбрали аппарат с трубчато-фонтанирующей насадкой.

3.2.1 Коэффициенты массоотдачи в газовой фазе

Коэффициенты массоотдачи в газовой фазе при капельном течении жидкости. Пучок трубчатой насадки представляет собой систему обтекаемых тел и поэтому при взаимодействии в нем газового потока и жидкости генерируется пульсационное движение всего слоя. Вследствие этого, а также из-за отрывного течения газового потока за каплей и элементом насадки с пленкой жидкости происходит деформация свободной поверхности раздела фаз. В этом случае, в слоях, прилегающих к поверхности фаз с двух сторон, возникают [89] небольшие завихренности, которые согласно Ламонту [90] играют основную роль в массопереносе, т.е. от глубины проникновения завихренности, являющейся мерой толщины колеблющегося пограничного слоя, зависит интенсивность переноса массы и тепла, как в дисперсном, так и в сплошном потоках.

Учитывая сложность данного вопроса, когда объектом исследования является массоперенос в турбулентном сплошном потоке, обычно используют подход, основанный на аналогии между трением и массоотдачей, т.к. перенос количества движения и массы осуществляется турбулентными пульсациями.

Эта аналогия в упрощенном виде имеет следующий вид [91,56 с.88]:

$$\frac{\beta_{gs}}{U_c} = \frac{\lambda_{mp}}{8} \cdot Sc^{1/3}, \quad (3.1)$$

где U_c – скорость сплошной фазы; λ_{mp} – коэффициент трения; $Sc = \nu_2 / D_2$ – число Шмидта для сплошной фазы.

В работе [75], сопоставляя корреляции для коэффициентов трения при течении в каналах λ_{mp} и коэффициентов сопротивления ξ при обтекании тел жидкостным или газовым потоком, пришли к выводу, что коэффициенты практически одинаково зависят от скорости газа, эквивалентного диаметра канала и плотности среды. На этом основании Р.Берд, В.Стьюарт и Е.Лайтфут [92] утверждают о возможности принять λ_{mp} и ξ как одну величину, характеризующую механизм движения потоков.

Действительно, капельное течение в контактных устройствах в интенсивных режимах можно представить в упорядоченном виде, т.е. сплошной поток проходит по каналу, образованному каплями с долей $1-\varphi$. На этом основании можно утверждать, что $\beta_2 \sim \xi$ и $\beta_{2s} \sim \xi$. Тогда при капельном течении:

$$\frac{\beta_2}{U_\kappa} = \frac{\xi_\kappa}{8} Sc_2^{1/3}, \quad (3.2)$$

где U_κ – скорость капель; ξ_κ – коэффициент сопротивления капель.

Последний параметр зависит от режимов движения капли. Коэффициент сопротивления капли, как и пузыря, определяют по различным уравнениям. Однако многие из них не учитывают изменение их формы за счет воздействия внешних сил. В работе [93] академиком Балабековым О.С. дано уравнение для определения коэффициента формы капли, которое использовано им при расчете скорости массообмена в сплошной фазе. Оно имеет следующий вид:

$$\Phi = \frac{2v}{d_\kappa} = \kappa We^{1/5}, \quad (3.3)$$

где v – малая полуось эллипсоидной капли; We - число Вебера:

$$We = \frac{U_\kappa^2 d_\kappa \rho_\kappa}{\sigma}, \quad (3.4)$$

где k - коэффициент пропорциональности, равный 1,1.

На основании этих зависимостей Балабеков О.С. предлагает для расчета сопротивления капли следующую формулу:

$$C_\kappa = C_{ш} \cdot \Phi^2, \quad (3.5)$$

где $C_{ш}$ – коэффициент сопротивление сферической (шарообразной) капли, определяемый в зависимости от режима ее движения в сплошном потоке.

Проведенные расчеты показали, что в аппарате с трубчатой насадкой режимы движения капель соответствуют диапазону $100 \leq Re_{\kappa.2} \leq 800$, в котором

$$C_{ш} = \frac{13}{Re_{\kappa.2}^{0,5}}, \quad (3.6)$$

где $Re_{к.з.}$ – число Рейнольдса для капли при движении ее в газовой среде:

$$Re_{к.з.} = \frac{U_{к} d_{к}}{\nu_{г}} \quad (3.7)$$

Тогда, на основании уравнения (3.2) получим:

$$\beta_{г} = 1,625 \cdot \frac{U_{к}^{1/2} \cdot \Phi^2 \cdot \nu_{г}^{5/6}}{d_{к}^{1/2} \cdot D_{г}^{1/3}} \quad (3.8)$$

С учетом коэффициента формы капли получим:

$$\beta_{гс} = B_{м} \cdot \frac{U_{к}^{13/10} \cdot \rho_{ж}^{2/5} \cdot \nu_{г}^{5/6}}{d_{к}^{1/10} \cdot \sigma^{2/5} \cdot D_{г}^{1/3}}, \quad (3.9)$$

где $B_{м} = 3,17 \cdot \xi_L$ – коэффициент корреляции.

Коэффициенты массоотдачи в газовой фазе в условиях барботажа. Для оценки эффективности массообменных аппаратов была использована известная и апробированная методика определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе в процессе адиабатического испарения воды в воздух.

Экспериментальные результаты поверхностных $\beta_{гс}$ коэффициентов массоотдачи определяли по общепринятой зависимости [56 с.496]:

$$\beta_{гс} = \beta_{г} \cdot A, \quad (3.10)$$

в которой $\beta_{г}$ - истинный коэффициент массоотдачи в газовой фазе, м/с; A - поверхность контакта фаз (ПКФ), отнесенная к площади тарелки (поперечному сечению аппарата), m^2 / m^2 ;

Для расчета ПКФ A в барботажных аппаратах часто используют следующие соотношения [56 с.488]:

$$A = \frac{6H_{сл} \cdot \varphi}{d_{п}} \quad (3.11)$$

Среднее значение высоты газожидкостного слоя [94]:

$$H_{сл} = \frac{h_{ж}}{1 - \varphi}, \quad (3.12)$$

где φ - газосодержание.

Уточненная формула для расчета среднего диаметра пузырька для крупноперфорированных противоточных тарелок в широком диапазоне изменения режимных и конструктивных параметров аппарата имеет вид [86 с.93]:

$$d_n = B_n \cdot \frac{\sigma^{3/4}}{g^{1/4} \rho_{ж}^{3/4} W_n}, \quad (3.13)$$

где $B_n=49$ – корректирующий коэффициент.

Вихревой режим, реализуемый в аппаратах с комбинированной трубчато-взвешенной насадкой и с применением крупноперфорированных противоточных тарелок, дает основание использовать уравнение (3.13) для расчета диффузионного диаметра пузыря в области стохастического изменения формы пузырька, т.е. в режиме пульсирующего движения. При этом значение корректирующего коэффициента составляет $B_n=77,4$. В работе [86 с.94] дано объяснение повышенного значения корректирующего коэффициента по сравнению с теоретической зависимостью, заключающееся в том, что формула (3.13) получена чисто с динамической позиции, т.е. описывает средний гидродинамический диаметр пузырька. Действительно, визуальные наблюдения показывают, что очень мелкие пузырьки находятся в постоянной циркуляции вместе с жидкостью, т.е. в застойной зоне. Такое объяснение допустимо также с позиции гидродинамического и диффузионного пограничного слоя. Кроме того, пульсирующий пузырь газа, имея меньший размер, может значительно турбулизовать ПКФ [86 с.94].

Постоянство коэффициента сопротивления в режиме пульсирующего движения показывает, что возникаемые пульсации значительно интенсифицируют пограничный слой жидкости. Поэтому не зависят от числа Рейнольдса при $Re_n > 1530$ [56 с.79].

Это условие позволяет принять модель обновления поверхности для оценки интенсивности переноса массы. Согласно Данквертса [56 с.83]:

$$\beta = \sqrt{D \cdot f_{сл}}, \quad (3.14)$$

где $f_{сл}$ – скорость обновления поверхности. На основании аналогии механизмов формирования пульсационного газожидкостного слоя в аппаратах с комбинированной трубчато-взвешенной насадкой и с крупноперфорированными тарелками воспользуемся уравнением, полученным в работе [86 с.60] для расчета скорости обновления поверхности:

$$f_{сл} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g\psi_g}{kH_{сл}}}, \quad (3.15)$$

в котором, частотная характеристика ψ_g определяется по формуле (2.75) раздела 2.

Тогда, после подстановки (3.15) и (2.75) в (3.14) имеем:

$$\beta = \frac{2^{1/4} g^{1/4} \psi_B^{1/4} D^{1/2}}{(2\pi)^{1/2} k^{1/4} H_{сл}^{1/4}}. \quad (3.16)$$

Обозначив через K_1 все постоянные коэффициенты и переходя к газовой фазе:

$$\beta_z = K_1 \cdot \frac{g^{1/4} \cdot \psi_6^{1/4} \cdot D_z^{1/2}}{H_{cl}^{1/4}} \quad (3.17)$$

$$\beta_{zS} = \beta_z \cdot A = K_1 \cdot \frac{h_{жс}^{3/4} \cdot g^{1/4} \cdot \psi_6^{1/4}}{d_n} \cdot D_z^{1/2} \quad (3.18)$$

Сопоставление с экспериментальными данными позволило получить расчетное уравнение для определения поверхностного коэффициента массоотдачи в газовой фазе для аппарата с комбинированной трубчато-фонтанирующей насадкой:

$$\beta_{zS} = K_\beta \cdot \frac{h_{жс}^{3/4} \cdot g^{1/4} \cdot \psi_6^{1/4}}{d_n} \cdot D_z^{1/2}, \quad (3.19)$$

где $K_\beta = 15,6 / (1 - \varphi_{ТФ}^{0,75})$ - корректирующий коэффициент.

3.2.2 Коэффициенты теплоотдачи

Коэффициенты теплоотдачи в трубах трубчатого пучка. В работе [52 с.99] проведены исследования коэффициентов теплоотдачи при движении теплоносителя в трубах трубчатого пучка. Отмечено, что интенсивность теплообмена может изменяться в широких пределах и в большей степени зависит от скорости движения потока. Изменение температуры жидкости происходит как по сечению, так и по длине трубы [95].

Анализ многочисленных результатов исследований и полученных расчетных зависимостей позволяет рекомендовать для расчета среднего коэффициента теплоотдачи следующие критериальные уравнения [96-98]:

ламинарное течение

вязкостный режим

$$Nu_{жс,d} = 0,15 \cdot Re_{жс,d}^{0,33} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot \varepsilon_l; \quad (3.20)$$

вязкостно-гравитационный режим

$$Nu_{жс,d} = 0,15 \cdot Re_{жс,d}^{0,33} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \times Gr_{жс,d}^{0,1} \cdot \varepsilon_l; \quad (3.21)$$

турбулентное течение

$$Nu_{жс,d} = 0,021 \cdot Re_{жс,d}^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot \varepsilon_l. \quad (3.22)$$

За определяющую температуру принята средняя температура жидкости; за определяющую скорость — средняя скорость жидкости в трубе; за

определяющий размер – диаметр круглой трубы или *эквивалентный диаметр* трубы любой формы ($d_{\text{эке}} = 4F/P$, где P – внутренний периметр канала, м).

Эти формулы дают среднее значение α при $l/d > 50$. Они применимы для любой жидкости. Для труб, имеющих длину $l < 50 \times d$, следует полученное значение α умножить на средний поправочный коэффициент ε_l , величина которого приведена в [96].

Во многие критериальные уравнения конвективной теплоотдачи входит множитель $(Pr/Pr_{\text{ст}})^{0,25}$, учитывающий направление теплового потока и близкий к единице, когда температуры жидкости и стенки не сильно отличаются [52 с.106]. При вычислении критерия $Pr_{\text{ст}}$ значения физико-химических свойств жидкости надо брать по температуре стенки [99]. У капельных жидкостей с возрастанием температуры величина критерия Pr уменьшается. Следовательно, для капельных жидкостей при нагревании $Pr/Pr_{\text{ст}} > 1$, а при охлаждении $Pr/Pr_{\text{ст}} < 1$. На этом основании при проектировании теплообменников в расчете коэффициентов теплоотдачи для нагреваемых жидкостей можно принимать $(Pr/Pr_{\text{ст}})^{0,25} = 1$, допуская небольшую погрешность в сторону уменьшения коэффициентов теплоотдачи, т.е. в сторону запаса. Для охлаждающихся жидкостей, когда $Pr/Pr_{\text{ст}} \geq 0,5$, с достаточной точностью можно принимать среднее значение $(Pr/Pr_{\text{ст}})^{0,25}$, равное 0,93.

Коэффициенты теплоотдачи в объеме комбинированной регулярно-взвешенной насадки. Известно, что для осуществления переноса тепла и массы необходимо различие потенциалов в разных точках среды. Применительно к режимам работы тепломассообменных аппаратов в качестве потенциала для переноса тепла принимается температура, а для переноса массы (водяного пара) – парциальное давление водяных паров. Следовательно, разница температур отдельных точек среды обуславливает перенос тепла, а различие парциальных давлений – перенос массы [100].

Реальные процессы в контактных аппаратах протекают в условиях вынужденного движения обменивающихся сред, т.е. в условиях конвективного тепло- и массопереноса. При этом коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи в общем случае могут быть получены из балансовых уравнений конвективного переноса тепла и массы. Для этого прибегают к упрощениям и считают, что коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи постоянны по поверхности.

Согласно [61] температурное поле в слое насыщенного газа не зависит от физических свойств среды, а полностью определяются формой рассматриваемого тела. Другими словами, тепло- и массообмен между жидкостью и газом при их непосредственном контакте автомоделен относительно чисел подобия, включающих только физические характеристики сред, в том числе относительно чисел Льюиса, Прандтля и др. В данном случае форма примыкающих друг к другу слоев насыщенного и ненасыщенного газа является одинаковой и для теплообмена и массообмена, уравнения переноса энергии и массы и краевые условия к ним для своих областей задания являются полностью тождественными друг другу относительно переменных температур

и концентраций. Этим самым утверждается аналогия процессов тепло- и массообмена при непосредственном контакте газа и жидкости [61].

Рассматривая подобия геометрических, физических характеристик потоков, полей скоростей и изменений статических давлений, изменения полей температур и парциальных давлений при выполнении двух условий однозначности:

1) соответствие геометрического равенства границ тепла и массы;

2) соблюдение подобия изменения температур и парциальных давлений в сходственных точках аппарата, автором [100] отмечено сохранение постоянства отношения коэффициентов переноса тепла и массы:

$$\frac{\alpha}{\beta_d} = c'_p. \quad (3.23)$$

В работе [101] для расчета коэффициентов теплоотдачи получено уравнение, в котором коэффициент массоотдачи в газовой фазе получен на основе первого закона Фика:

$$\alpha = B_\alpha \cdot c'_p \left[\frac{\xi_L}{t_\theta \cdot \varphi_{яч} \cdot v_\Gamma} \frac{D_\Gamma^2 \cdot U_\Gamma^3}{\nu_\Gamma} \right]^{1/4}, \quad (3.24)$$

где $B_\alpha = 7,28 \cdot \left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/4}$ - опытный коэффициент, учитывающей поверхность контактного теплообмена.

В нашем случае для расчета коэффициентов массоотдачи в газовой фазе приняты другие подходы. Тогда, с учетом (3.9) и (3.19), уравнение (3.23) примет вид:

при скорости газового потока 1-3 м/с [88]

$$\alpha_1 = B_\alpha \cdot \frac{U_\kappa^{13/10} \cdot \rho_{ж}^{2/5} \cdot \nu_2^{5/6}}{d_\kappa^{1/10} \cdot \sigma^{2/5} \cdot D_2^{1/3}}, \quad (3.25)$$

где $B_\alpha = 3,17 \cdot \xi_L \cdot c'_p$ - коэффициент корреляции.

при скорости газового потока 4-5 м/с [88]

$$\alpha_2 = K_\alpha \cdot \frac{h_{ж}^{3/4} \cdot g^{1/4} \cdot \psi_\theta^{1/4}}{d_n} \cdot D_2^{1/2}, \quad (3.26)$$

где $K_\alpha = 15,6 / (1 - \varphi_{ТФ}^{0,75}) \cdot c'_p$ - корректирующий коэффициент.

Таким образом, получены уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи, учитывающие структуру газожидкостного слоя при изменении режимов работы аппарата.

4 ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ В АППАРАТЕ С КОМБИНИРОВАННОЙ РЕГУЛЯРНО-ВЗВЕШЕННОЙ НАСАДКОЙ

4.1 Методика экспериментального исследования процесса пылеулавливания

Исследование процесса пылеулавливания проведено на лабораторной установке, схема которой представлена на рисунке 2.1.

Для распыления порошков в подводящем газоходе был установлен пылеподатчик ЛИОТ, который хорошо зарекомендовал себя надежностью в эксплуатации, высокой дезинтеграцией частиц, возможностью регулирования производительностью в зависимости от расхода газа, подаваемого в аппарат [102,103].

При определении общей эффективности процесса пылеулавливания использовали метод внутренней фильтрации. Для заполнения аллонжей применяли стекловату. Расход газа через аллонжи устанавливали исходя из условия изокINETического отбора.

В качестве стандартной пыли применяли пылевидный кварц КП-3, дополнительно размолотый на вибромельнице ВНИИМСМ типа М-10.

Во всех экспериментах концентрация пыли на входе в аппарат поддерживалась около $2\text{г}/\text{м}^3$.

При определении общей эффективности пылеулавливания запыленность потока ($\text{г}/\text{нм}^3$) определяли по уравнению

$$Z = \frac{q}{\mathcal{G}_0 \cdot \tau}, \quad (4.1)$$

где q – привес пыли в аллонже, г; \mathcal{G}_0 – объемная скорость газа при отборе, приведенная к нормальным условиям, $\text{нм}^3/\text{с}$; τ – продолжительность отбора, с.

В опытах со стандартной пылью, начальную запыленность потока газа определяли по формуле:

$$Z_H = \frac{m}{\mathcal{G}_r \cdot \tau_{он}}, \quad (4.2)$$

в которой m – масса пыли, распыленной пылеподатчиком за опыт, г; \mathcal{G}_r – объемный расход газа через аппарат, $\text{нм}^3/\text{с}$; $\tau_{он}$ – продолжительность опыта, с.

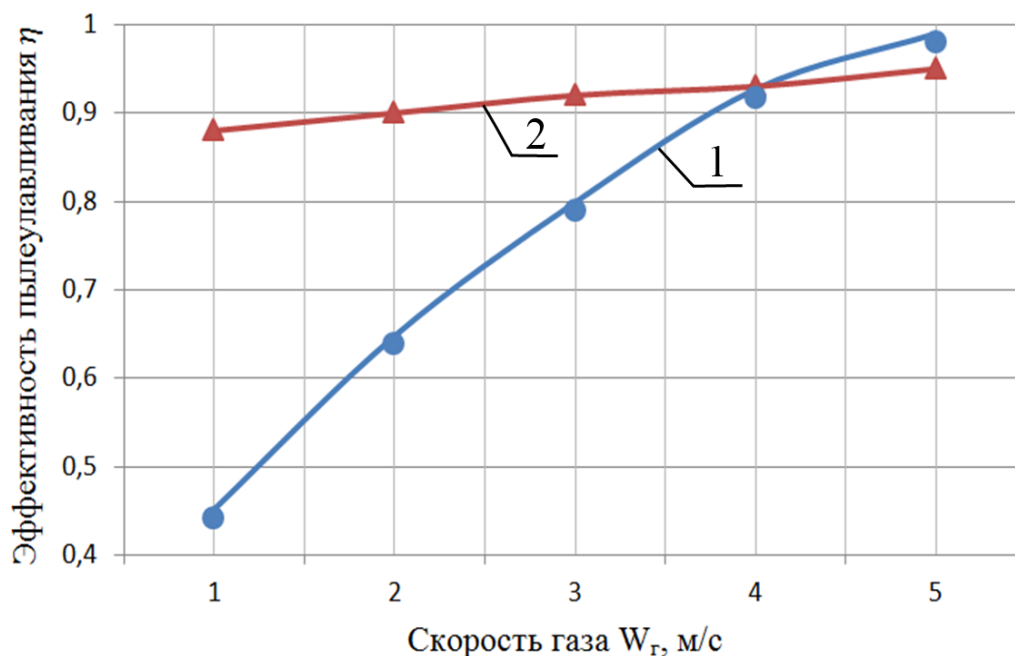
Поскольку при проведении исследований количество воздуха, поступающего в аппарат и выходящего из него, практически не изменялось, то общую эффективность очистки $\eta_{общ}$ (%) рассчитывали по уравнению:

$$\eta_{общ} = \frac{Z_H - Z_K}{Z_H} \cdot 100 \quad (4.3)$$

Здесь Z_H и Z_K – начальная и конечная запыленность газового потока, соответственно, $\text{г}/\text{нм}^3$.

4.2 Влияние режимных параметров на эффективность пылеулавливания

Результаты исследований общей эффективности пылеулавливания аппарата с трубчато-фонтанирующей насадкой и аппарата со взвешенной насадкой (ВН) в зависимости от скорости газового потока и плотности орошения представлены на рисунках 4.1 и 4.2 [104].



Условия опытов: аппарат ТФ (одна опорно-распределительная решетка; $\rho_H = 600$ кг/м³; $d_H = 0,015$ м; $H_{ст} = 0,03$ м; $S_K/S_{ап} = 0,28$ м²/м²; $t_B/b = 4$; $t_P/b = 2$; $L = 15$ м³/м²·ч); аппарат ВН ($S_o = 0,4$ м²/м²; $H_{ст} = 0,2$ м; $\rho_H = 650$ кг/м³; $d_H = 0,04$ м; $\alpha = 60^\circ$; $L_o = 20$ м³/м²·ч) [21 с.146]

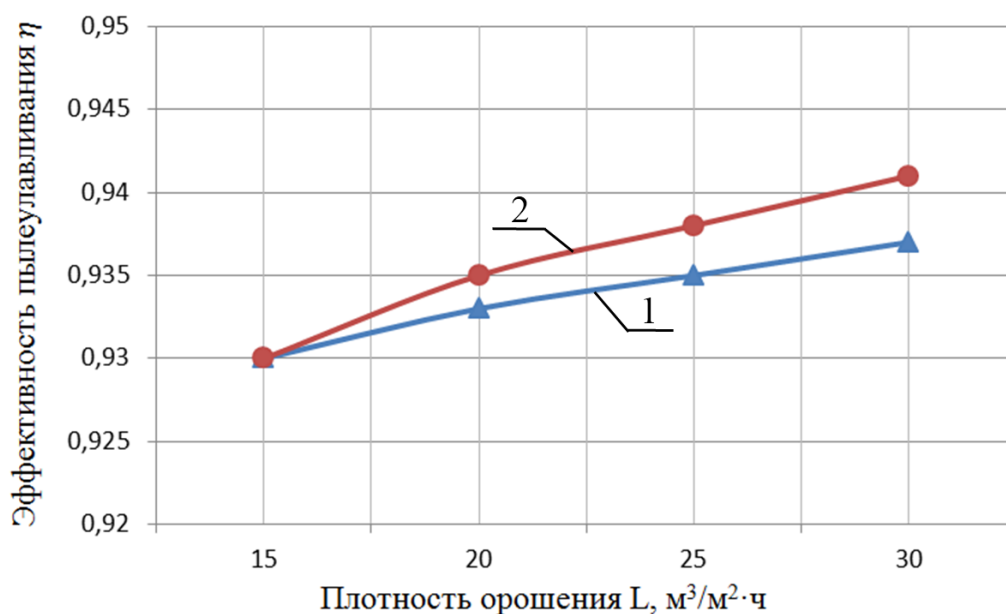
1 - η – трубчато- фонтанирующая насадка;

2 - η - взвешенная насадка (ВН) [21 с.146]

Рисунок 4.1 – Зависимость общей эффективности пылеулавливания аппаратов с подвижной насадкой от скорости газа

Как видно из рисунка 4.1 с увеличением скорости газового потока общая эффективность пылеулавливания возрастает как у исследуемого аппарата, так и в аппарате ВН. Это связано с тем, что при повышении скорости газа происходит значительная турбулизация потоков и растет межфазная турбулентность.

В работах, посвященных изучению процесса пылеулавливания в аппаратах ПН [21 с.145] подчеркивается перспективность их применения в процессах мокрого обеспыливания газов, сопровождающихся образованием взвесей и осадков. При этом исследователи полагают, что механизм пылеулавливания носит турбулентно-инерционный характер. Эффективность процесса зависит от многих факторов, из которых основными являются физико-химические свойства пыли и гидродинамический режим работы аппарата [21 с.146].



Условия опытов см. рисунок 4.1. $w_r = 4 \text{ м/с}$
 1 - η – трубчато- фонтанирующая насадка;
 2 - η - взвешенная насадка (ВН) [21 с.146]

Рисунок 4.2 – Зависимость общей эффективности пылеулавливания аппаратов с подвижной насадкой от плотности орошения

Кривая общей эффективности пылеулавливания комбинированного аппарата с трубчато-фонтанирующей насадкой расположена выше, чем аналогичная кривая для аппарата ВН. Более высокая эффективность аппарата с трубчато-фонтанирующей насадкой обусловлена реализацией режима одновременного вихреобразования, реализуемого при шаге расположения труб $t_B/b=4$.

С увеличением плотности орошения общая эффективность пылеулавливания аппаратов с подвижной насадкой растет. Это связано с увеличением поверхности контакта фаз за счет роста числа капель жидкости и пузырей в газожидкостном слое, участвующих в процессе.

4.3 Математическая модель турбулентно-диффузионного осаждения твердых частиц

Как известно, улавливание твердых частиц размером менее $0,1 \mu\text{м}$ происходит вследствие молекулярной диффузии.

В аппаратах с регулярной структурой насадки реализуется турбулентный режим, характеризующийся вихреобразованием.

Твердые частицы пыли имеют размер значительно меньше масштаба турбулентных пульсаций и поэтому вовлекаются в пульсационное движение газового потока. Причем, степень увлечения также зависит от диаметра и плотности частиц, т.е. от ее инерционности [105]. Следовательно, при расчете эффективности осаждения в интенсивных режимах течения газа необходимо учитывать наряду с инерционным механизмом осаждения и молекулярной

диффузией также турбулентную диффузию, которая вносит существенный вклад в эффективность улавливания частиц с размером 1-2 мкм и более [106].

Рассмотрим диффузию частиц пыли к поверхности осаждения, которая представлена пленками, струями и каплями жидкости, причем принимаем, что диаметр частиц мал по сравнению с масштабом вихрей.

Уравнение, описывающее перенос массы за счет молекулярной и турбулентной диффузии имеет вид [107]:

$$\frac{dm}{d\tau} = D_3 \cdot A \cdot \frac{\Delta Z}{\Delta x}, \quad (4.4)$$

где m – количество уловленной пыли, кг; τ – время, с; D_3 – эффективный коэффициент диффузии, м²/с; $\Delta Z = Z_2 - Z_1$ – разность концентраций (движущая сила процесса), кг/м³; Δx – размер ячейки, в которой происходит осаждение, м; A – поверхность контакта фаз, м².

Эффективный коэффициент диффузии определяется по уравнению:

$$D_3 = D_M + D_T, \quad (4.5)$$

в котором D_M, D_T – соответственно, коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузии, м²/с.

Коэффициент молекулярной диффузии для частиц размером $d_u > \ell_i$, равен [106,108]:

$$D_M = \frac{K_\sigma \cdot T \cdot C_k}{3\pi \cdot \nu_r \cdot d_u}, \quad (4.6)$$

где K_σ – постоянная Больцмана, ($K_\sigma = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/к); T – абсолютная температура, К; C_k – поправка Кенингема-Мелликена:

$$C_k = 1 + \frac{10^{-4}}{p \cdot d} \cdot [6,32 + 2,01 \exp(-1095 \cdot p \cdot d)], \quad (4.7)$$

здесь p – давление среды, Па.

Коэффициент турбулентной диффузии частиц является функцией пульсационной скорости потока \bar{u}' и его определяющего размера ℓ и не зависит от физических свойств потока [106,107]:

$$D_T \approx 0,7 \cdot \bar{u}' \cdot \ell, \quad (4.8)$$

где $\ell = \frac{\rho \cdot d \cdot u}{18\mu_r}$ – длина инерционного пробега частицы, м.

Количественное значение ℓ зависит от величины инерционной силы, которая воздействует на твердую частицу в момент ее выброса из турбулентного потока. Следовательно:

$$D_T = 0,7 \cdot \bar{u}' \cdot \frac{\rho_u \cdot d_u^2 \cdot u_u}{18\mu_r}. \quad (4.9)$$

здесь \bar{u}' – пульсационная скорость, м/с; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность твердой частицы, кг/м³; $d_{\text{ч}}$ – диаметр частицы, м; $u_{\text{ч}}$ – скорость движения частицы, м/с.

При определении величины коэффициента турбулентной диффузии отмечено, что при обтекании насадочных элементов реализуется турбулентный режим течения. Здесь же выброс пыли из турбулентного ядра осуществляется только за счет сил инерции.

Определяя мощность потока в зоне трубчато-фонтанирующей насадки с учетом средней пульсационной скорости u' (уравнение 4.7), получим формулу для расчета коэффициента турбулентной диффузии:

$$D_T = 0,177 \cdot (\xi_L)^{1/3} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{общ}})^{1/3} \cdot \left(\frac{H_{\text{cm}}}{d_{\text{у}}}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{H}{t_B}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}}\right)^{1/3} \cdot (h_0)^{-1/3} \cdot d_k^{4/3} \cdot u_{\text{г}} \cdot Stk, \quad (4.10)$$

где $Stk = \frac{\rho_{\text{ч}} \cdot d_{\text{ч}}^2 \cdot u_{\text{ч}}}{18\mu_{\text{г}} \cdot d_k}$ – критерий Стокса.

Эффективность пылеулавливания определяется по формуле:

$$\eta = 3,0 \cdot \left(\frac{W_{\text{г}} \cdot d_k}{D_{\text{т}}}\right)^{-1/4}. \quad (4.11)$$

Таким образом, для расчета эффективности пылеулавливания получено уравнение, учитывающее изменения режимных и конструктивных параметров. Это уравнение может быть использовано для расчета общей эффективности, а с известным фракционным составом пыли и для расчета фракционной эффективности.

5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ВНЕДРЕНИЕ АППАРАТА С КОМБИНИРОВАННОЙ РЕГУЛЯРНО-ВЗВЕШЕННОЙ НАСАДКОЙ

5.1 Рекомендации по проектированию аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой

Применительно к аппаратам с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой нами предложены следующие рекомендации.

Скорость газа рекомендуется выбирать в диапазоне: для трубчато-взвешенной $W_{\Gamma} = 3,0 \div 4,5$ м/с; трубчато-фонтанирующей $W_{\Gamma} = 1,5 \div 4,0$ м/с. Эти диапазоны являются наиболее устойчивыми и эффективными.

Плотность орошения при проведении процессов абсорбции, контактного теплообмена и пылеулавливания определяют на основе материального баланса, растворимости газа и концентрации улавливания компонентов в газе и жидкости. Минимальная плотность орошения составляет $L=10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

Конструктивные параметры аппаратов. К таким параметрам относятся:

Для трубчатой насадки:

шаги размещения труб в объеме рабочей зоны:

- шаг между трубами по вертикали t_v/b - 4;
- шаг между трубами по горизонтали t_p/b - 2.

Рекомендуемыми размерами труб для промышленных аппаратов являются $d=40$ мм.

Минимальная высота насадочной зоны составляет 1 м.

Для дискретной шаровой насадки:

Размеры шаровой насадки: $d_{ш} = 0,015$ м; $\rho_{ш} = 600$ кг/м³.

Высота статического слоя $H_{ст} = 0,03 \div 0,1$ м.

Опорно-распределительная решетка (свободное сечение): плоская $S_0 > 0,95$ м²/м². Свободное сечение пирамидальной (конусной) решетки в нижнем основании $S_0 > 0,95$ м²/м². Сужение сечения выбирают из расчета $W_{к}/W_{ап} = 5 \div 10$.

Оросительные устройства. В аппаратах с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой, элементы насадки являются центрами дробления и перераспределения жидкости. Поэтому особых требований к оросительным устройствам не предъявляются. Возможно применение различных конструкций оросительных устройств, включая низконапорные.

Каплеуловитель. Он устанавливается в тех случаях, когда рабочая скорость газа в аппарате превышает 4,5 м/с [3 с.171]. Конструкция каплеуловителя подбирается исходя из количества жидкости, уносимой из аппарата и ограничений по гидравлическому сопротивлению. Выбор осуществляется по справочной литературе [14,109,110].

Материал для изготовления насадочных элементов выбирается исходя из физико-химических свойств обрабатываемых сред.

5.2 Методики расчета аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой

На основании проведенных исследований получены уравнения для определения гидродинамических, тепломассообменных характеристик и параметров пылеулавливания аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой, составляющих инженерную методику расчета.

Таблица 5.1 – Инженерная методика расчета аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой

№ п/п	Рассчитываемые характеристики	Уравнение для расчета
1.	Гидравлическое сопротивление насадочной зоны	(2.31) с учетом (2.32), (2.37)
2.	Количество удерживаемой жидкости:	
	- трубчато-взвешенной насадки	(2.46) с учетом (2.40), (2.39) и (2.42)
	- трубчато-фонтанирующей насадки	(2.51) с учетом (2.40), (2.49) и (2.42)
3.	Газосодержание слоя:	
	- трубчато-взвешенной насадки	(2.47) с учетом (2.41) и (2.45)
	- трубчато-фонтанирующей насадки	(2.52) с учетом (2.50) и (2.45)
4.	Коэффициент массоотдачи в газовой фазе трубчато-фонтанирующей насадки:	
	- при капельном течении жидкости	(3.9) с учетом (2.33)
	- в условиях барботажа	(3.20) с учетом (2.40), (2.75) и (2.52)
5.	Коэффициент теплоотдачи в трубах трубчато-фонтанирующей насадки	(3.21), (3.22) и (3.23)
6.	Коэффициент теплоотдачи насадочной зоны:	
	- при капельном течении жидкости	(3.26) с учетом (3.9)
	- в условиях барботажа	(3.27) с учетом (3.20)
7.	Эффективность пылеулавливания трубчато-фонтанирующей насадки	(4.11) с учетом (4.10) и (2.33)

5.3 Промышленные испытания и внедрение аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой

Аппараты с трубчатой насадкой регулярной структуры показали высокую эффективность работы во многих производствах АО «Актюбинский завод хромовых соединений». Газоочистной аппарат с трубчатой насадкой внедрен в схеме очистки газовых выбросов прокалочной печи №2 в производстве окиси хрома [111]. Аппарат с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой внедрен

в схеме очистки отходящих газов в процессе окислительного обжига шихты в производстве монокромата натрия [112].

Производство монокромата натрия состоит из следующих стадий технологического процесса [113]:

- 1 подготовка сырьевых материалов;
- 2 приготовление шихты;
- 3 окислительный обжиг шихты;
- 4 выщелачивание спека;
- 5 фильтрация шламовой пульпы;
- 6 очистка монокромата натрия от примесей;
- 7 сушка шлама.

На рисунке 5.1 представлена технологическая схема очистки отходящих газов в процессе окислительного обжига шихты в производстве монокромата натрия.

Для проведения окислительного обжига шихты используется хромитовая руда (основным рудообразующим материалом в них является хромшпендилит) и кальцинированная сода. Окислительный обжиг хромитовой руды проводят во вращающихся барабанных печах 1 при температуре 1200-1300⁰С. Печь нагревается газами, полученными при сжигании природного газа. Длина печей 55 м, наружный диаметр 2,8 м. Печи установлены на 4-х роликовых опорах наклонно, угол наклона 3%, скорость вращения печи – 1,33 об/мин. Печи внутри футерованы шамотным кирпичом. Для уменьшения пылеуноса в верхнем конце печи монтируется порог из нержавеющей стали, для увеличения времени пребывания материала (спека) в зоне высоких температур на выходе из печей предусмотрен порог из шамотного кирпича. Спек из барабанной печи поступает в холодильный барабан 8. Охлаждение производится оборотной водой, которая затем откачивается насосом 10 из бака оборотной воды 9 на производственные нужды.

Газы, выходящие из прокалочных печей, уносят до 60% тепла и имеют температуру 550-650⁰С. Для рекуперации тепла отходящих газов используются котлы-утилизаторы 2 типа КУ-50, в которых тепло отходящих газов используется для получения пара с давлением 1,2 МПа. Осаждающаяся пыль в котлах-утилизаторах собирается в бункерах, из которых транспортируется в бункер пыли по винтовому конвейеру 5 на приготовление шихты.

В существующей схеме очистки газа перед выбросом в атмосферу они проходят очистку в электрофильтрах ТС-6. На выбросе в атмосферу газы имеют температуру в пределах не более 150⁰С. После электрофильтра 4 газовый поток дымососом 11 через санитарную трубу 12 выбрасывается в атмосферу.

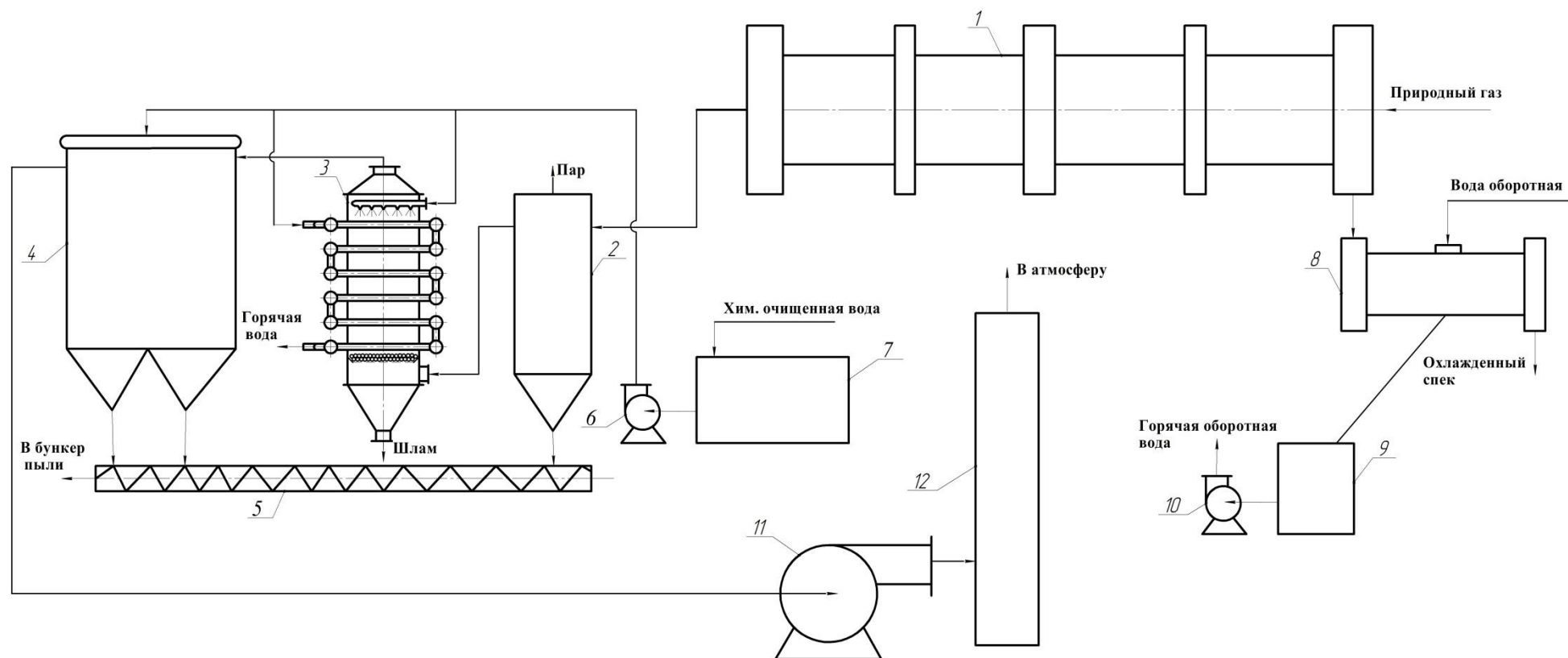
Для дальнейшего снижения температуры газового потока и снижения пылевой нагрузки предложено перед электрофильтром 4 установить аппарат с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой 3. Работа такого аппарата происходит следующим образом.

Газовый поток, поступающий на очистку, подается через входной штуцер. Взаимодействие газа и жидкости, подаваемой через ороситель, происходит в противоточном режиме в объеме насадочной зоны, представляющей собой пучок труб регулярно расположенных в вертикальном и радиальном направлениях. При значениях вертикальных шагов (для труб круглого поперечного сечения равным 4 диаметрам трубы) создается режим одновременного вихреобразования (синфазный режим) взаимодействия вихрей, образующимися за трубами. В результате такого взаимодействия суммарная мощность вихрей увеличивается, что позволяет совершить большую работу по дроблению орошающей жидкости и созданию высокоразвитой межфазной поверхности.

В трубном пучке движется теплоноситель, подача которого осуществляется по схеме входной патрубков – коллектор – трубы – коллектор – выходной штуцер, далее нижерасположенные слои труб и вывод теплоносителя через патрубков.

Очищенный газовый поток выводится из аппарата через верхний патрубок, а отработанная жидкость стекает через нижний штуцер.

Установка конусных опорно-распределительных решеток с расположенными на ней дискретными контактными элементами (резиновыми шарами) позволяет обеспечить незабываемость внутренних элементов контактной зоны. Это достигается тем, что при рабочих скоростях газового потока происходит взвешивание контактных элементов и их движение от центральной части аппарата к его краям. При этом контактные элементы соударяются с трубами, стенками аппарата и между собой, что приводит к очищению их поверхности. Кроме этого, соударения приводят к дополнительному дроблению жидкости, вызывая увеличение межфазной поверхности.



1 – барабанная вращающаяся печь; 2 – котел-утилизатор; 3 – аппарат с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой; 4 – электрофильтр; 5 – конвейер винтовой; 6 – насос хим.очищенной воды (ХОВ); 7 – бак ХОВ; 8 – барабан холодильный; 9 – бак оборотной воды; 10 – насос; 11 – дымосос; 12 – санитарная труба

Рисунок 5.1 – Технологическая схема очистки отходящих газов в процессе окислительного обжига шихты в производстве монокромата натрия

Выполнение опорно-распределительных решеток конусными позволяет существенно снизить нижний диапазон рабочих скоростей газа. Если в аппарате с плоской опорно-распределительной решеткой начало взвешивания контактных элементов происходит при скорости газа около 4 м/с, то в аппарате с конусными опорно-распределительными решетками 1,5 м/с. Это позволяет обеспечить рабочий режим аппарата при значительно меньших энергозатратах.

Во время испытаний, проводимых совместно сотрудниками ЮКГУ им. М.Ауэзова и АО «АЗХС» (приложение А), получены данные исследований. Диапазоны изменения замеров основных параметров газового потока при прохождении газоочистного оборудования показали, что:

До котла утилизатора

- температура газа 815-823⁰С;
- давление (-680-750) Па;
- расход газа 27100-27980 нм³/ч.

После аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой

- температура газа 158-170⁰С;
- давление (-805-840) Па;
- расход газа 28350-29220 нм³/ч;
- концентрация пыли 0,310-0,930 г/нм³.

Эффективность очистки составила 97-98,6%.

После электрофильтра

- температура газа 124-130⁰С;
- давление (-890-950) Па;
- расход газа 28350-29220 нм³/ч;
- концентрация пыли 0,006-0,018 г/нм³.

В результате проведенных испытаний подтверждена высокая эффективность проведения процесса газоочистки и значительная интенсификация процесса теплообмена в аппарате с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой.

Аппарат с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой внедрен в технологической схеме очистки отходящих газов в процессе окислительного обжига шихты в производстве монокромата натрия (приложение Б). Установка аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой приводит к снижению концентрации выбросов пыли и к уменьшению экономического ущерба в 34,6 раз (приложение В).

Кроме того, результаты НИР по созданию аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой и методики расчета внедрены в учебный процесс для проведения лекционных и практических занятий по дисциплине «Современное промышленное оборудование» (приложение Г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткие выводы по результатам диссертационных исследований.

1. На основе анализа конструкций аппаратов со взвешенной и регулярной подвижной насадкой обоснован выбор объекта исследований - аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой, позволяющего проводить процессы тепломассообмена и пылеулавливания. Сформулированы задачи для проведения исследований и создания научно-обоснованных методов расчета.

2. Применительно к аппаратам с комбинированной регулярно – взвешенной насадкой получены уравнения для определения удельной поверхности трубчато - шаровой насадки (трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей), их объемной порозности, а также уравнение для расчета ее эквивалентного диаметра.

3. Проведены исследования гидравлического сопротивления аппаратов с трубчато-взвешенной и трубчато-фонтанирующей насадкой при секционировании двумя опорно-распределительными решетками с одним слоем шаров при отсутствии орошения и с орошением. Установлено, что численные показатели гидравлического сопротивления являются значительными и применение секционированных аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой может быть экономически оправдано в случае их использования для очистки пыли, обладающей повышенными адгезионными свойствами.

4. Проведены исследования гидродинамики насадочной зоны аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой и на основе полученных результатов выведены расчетные уравнения гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости, газосодержания слоя, диаметра капель и пузырей, а также определения частотных характеристик газожидкостного слоя.

5. Проведены исследования тепломассообменных характеристик насадочной зоны аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой и на основе полученных результатов выведены расчетные уравнения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и коэффициентов теплоотдачи.

6. Проведены исследования процесса пылеулавливания в аппарате с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой при изменении режимных параметров и полученные результаты использованы при разработке математической модели турбулентно-диффузионного осаждения твердых частиц и получения формул для расчета коэффициента турбулентной диффузии и эффективности пылеулавливания.

7. Результаты исследований, полученные расчетные зависимости по гидродинамике, тепломассообмену и пылеулавливанию положены в основу инженерной методики расчета аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой и рекомендаций по проектированию и эксплуатации.

8. Разработан и внедрен аппарат с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой на АО «Актюбинский завод хромовых соединений» в технологической схеме очистки газовых выбросов в процессе окислительного обжига шихты в производстве монокромата натрия. При этом снижена концентрация выбросов пыли и в 34,6 раз уменьшен экономический ущерб.

Оценка полноты решений поставленных задач. Результаты теоретических исследований, экспериментальное изучение закономерностей взаимодействия газовой и жидкой фаз в контактной зоне комбинированной регулярно-взвешенной насадки, гидродинамики, процессов тепломассообмена и пылеулавливания, апробация в промышленных условиях полностью соответствуют поставленным в диссертации задачам.

Разработка рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов. Результаты экспериментального изучения гидродинамики, процессов тепломассообмена и пылеулавливания в аппарате комбинированной регулярно-взвешенной насадкой, разработанные инженерные методы расчета и рекомендации по проектированию промышленных аппаратов могут быть использованы инженерно-техническими работниками промышленных предприятий и научно-исследовательских организаций, а также в учебном процессе при чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторного практикума.

Исходными данными по конкретному использованию результатов являются физико-химические свойства взаимодействующих и обрабатываемых сред, методики инженерного расчета основных гидродинамических характеристик, параметров тепломассообмена и пылеулавливания, а также рекомендации по проектированию промышленных аппаратов, включающих выбор режимных и конструктивных параметров.

Оценка технико-экономической эффективности внедрения. По результатам проведенных исследований разработана конструкция промышленного аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой, которая внедрена на АО «Актюбинский завод хромовых соединений» в технологической схеме очистки газовых выбросов в процессе окислительного обжига шихты в производстве монокромата натрия. При этом снижена концентрация выбросов пыли и в 34,6 раз уменьшен экономический ущерб.

Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области. Анализ технико-экономических показателей разработанных и исследованных аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой показывает, что по ряду показателей, таких как энергетические показатели, материалоемкость, эффективность проведения процессов тепломассообмена и пылеулавливания, предлагаемый аппарат стоит в одном ряду с современными конструкциями тепломассообменных аппаратов и пылеуловителей и превосходит их по такому показателю как нечувствительность к загрязненности обрабатываемых сред.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учебник: В 2кн./В.Г. Айнштейн, М.к. Захаров, Г.А. Носов и др.; Под ред. В.Г. Айнштейна. М.: Логос; Высшая школа, 2003. Кн.1. - 912 с.
- 2 Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учебник: В 2кн./В.Г. Айнштейн, М.к. Захаров, Г.А. Носов и др.; Под ред. В.Г. Айнштейна. М.: Логос; Высшая школа, 2003. Кн.2. - 872 с.
- 3 Балабеков О. С., Волненко А.А. Расчет и конструирование тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой. – Шымкент, 2015. – 184с.
- 4 Балабеков О.С., Петин В.Ф. Закономерность взаимодействия вихрей, возникающих при отрывном обтекании потоком газа или жидкости дискретно расположенных вдоль него тел // Свидетельство о научном открытии №144. – М.: Международная ассоциация авторов научных открытий, 2000. – 4 с
- 5 Балабеков О.С., Волненко А.А., Пралиев С., Корганбаев Б.Н., Балабекова М.О., Викторов С.В. Закономерность формирования параллельно движущихся вихревых струй при течении потока газа или жидкости через систему поперек к нему расположенных дискретных источников // Свидетельство о научном открытии №269. – М.: Международная ассоциация авторов научных открытий, 2004. – 4 с.
- 6 Патент на полезную модель №2092 по заявке №2016/0474.2 от 25.08.2016г. МПК В01D 53/20, 47/14. Приоритет от 9.02.2016. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Бишимбаев В.К., Волненко А.А., Ескендиоров М.З., Протопопов А.В., Жантасов К.Т., Анарбаев А.А. Оpubл. 30.03.17, бюл. №6. – 4с.
- 7 Патент на полезную модель №3656 Республика Казахстан по заявке №2018/0037.2 от 16.01.2018г. МПК В01D 53/20 (2006/01); В01D 47/14 (2006/1) Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Ешжанов А.А., Абжапбаров А.А., Ескендиоров М.З., Жумадуллаев Д.К. Оpubл. 15.02.19, бюл. №7. – 4с.
- 8 Волненко А.А., Балабеков О.С., Жумадуллаев Д.К., Ешжанов А.А. Критерии конструирования газоочистного и тепломассообменного оборудования // Сб. материалов научно-практической конф. «Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана» – Минск: БНТУ, 2016. – С.18-19.
- 9 Йордан В. Скруббер Вентури и дезинтегратор для охлаждения используемых и отходящих газов // Черные металлы. – 1966. - №7. – С.399 – 401.
- 10 Балабеков О.С. Расчет и конструирование аппаратов с подвижной насадкой. – Алма-Ата, 1984. – 34 с.
- 11 А.с. 394059 СССР. Массообменный аппарат для очистки газ(пар) жидкость /Балтабаев Л.Ш. и др. Оpubл. 1980, Б.И.№34. – 3с.

12 Новиков А.И., Скворцов А.Н., Кишкарев В.А. Конические скрубберы с псевдооживленной шаровой насадкой для очистки газов. // Химическая промышленность, 1974. №11. – 849с.

13 Балабеков О.С., Волненко А.А., Ешжанов А.А. Анализ работы и обобщение результатов исследований аппарата со взвешенной орошаемой насадкой // Междунар. науч.-практ. конф. «АУЭЗОВСКИЕ ЧТЕНИЯ - 15: «Третья модернизация Казахстана – новые концепции и современные решения», посвященной 120-летию Мухтара Омархановича Ауэзова - Шымкент: ЮКГУ им.М.Ауэзова, 2016г., т.3 – С.54-58.

14 Биргер М.И., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И. Справочник по пыли – и золоулавливанию // Под общ.ред. А.А. Русанова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.

15 Котов В.М., Вальдберг А.Ю., Гельперин Н.И. Аппараты с псевдооживленным слоем орошаемой насадки и возможности их применения в процессах очистки газов и пылеулавливания. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1970. -56 с.

16 Котов В.М., Вальдберг А.Ю., Гельперин Н.И. Расчет пылеуловителей с псевдооживленным слоем орошаемой насадкой. // Промышленная и санитарная очистка газов, 1973. №5. - С. 1-5.

17 Ужов Н.Н., Вальдберг А.Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. – М.: Химия, 1972. - 248 с.

18 Тарат Э.Я., Балабеков О.С., Болгов Н.П. и др. Под общ. ред. Тарата Э.Я. Интенсивные колонные аппараты для обработки газов жидкостями. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1976. - 240 с.

19 Аксельрод Л.С., Яковенко М.М. Некоторые вопросы термодинамики массообменных аппаратов с подвижной шаровой насадкой. // Теоретические основы химической технологии, т. 3, 1968. № 1. - С. 148-150.

20 Гельперин Н.И., Лиференко В.А., Гришко В.З. Гидравлический расчет аппаратов с псевдооживленной шаровой насадкой. // Промышленная и санитарная очистка газов, 1976. № 3. - С. 14-16.

21 Ковалев О.С., Мухленов И.П., Тубалкин А.Ф., Балабеков О.С., Молдабеков Ш., Авдякова О.С. Абсорбция и пылеулавливания в производстве минеральных удобрений. – М.: Химия, 1987. – 208 с.

22 Буркат В.С. Исследование очистки отходящих газов электролитического производство алюминия от фтористого водорода и пыли в аппарате с орошаемой взвешенной шаровой насадкой. Автореф. дисс. канд. техн. Наук. – Л., 1973. - 23 с.

23 Котов В.М., Вальдберг А.Ю., Гельперин Н.И. Промышленная и санитарная очистка газов: Научно-технический реферативный сборник. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1973. №5. - С. 2-4

24 Вальдберг А.Ю., Дубинская Ф.Е., Исянов Л.М. Очистка промышленных газов в скрубберах Вентури. – М.: ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ, 1972. - 86 с.

25 Балабеков О.С. Гидродинамика, массообмен и пылеулавливание при противоточных и прямоточных двухфазных капельных и пленочных течениях в слое подвижной насадки: дис. ... докт. техн. наук. – М., 1984. – 430 с.

26 Волненко А.А., Балабеков О.С. Расчет тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой. Примеры и задачи. – Шымкент, 2016.- 223 с.

27 Инновационный патент №30217 Республика Казахстан. МПК В01D 53/20, В01D 47/14. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Балабеков О. С., Сарсенбекулы Д., Жумадуллаев Д.К., Корганбаев Б.Н.; заявитель и патентообладатель ЮКГУ им.М.Ауэзова. - № 2014/1176.1; заявл. 09.09.14; опубл. 17.08.15, Бюл. №8. – 4 с.

28 Инновационный патент №27719 Республика Казахстан, МПК В01D 53/20, В01D 47/14. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания/ А.А. Волненко, О.С. Балабеков, Б.Н. Корганбаев, Ж.Е. Хусанов, Н.С. Бекибаев; заявитель и патентообладатель ЮКГУ им.М.Ауэзова. - № 2013/0267.1; заявл. 04.03.13; опубл. 18.12.13, Бюл. №12. – 4 с.

29 Мустафина А.И. Гидродинамика и массообмен в аппарате с регулярной подвижной пластинчатой насадкой в широком диапазоне нагрузок по жидкости: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1989. – 180с.

30 Петин В.Ф. Разработка и моделирование массообменного аппарата с регулярной подвижной насадкой на основе импульсного взаимодействия фаз: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1982. – 241с.

31 Волненко А.А. Разработка интенсивных насадочных массообменных аппаратов с регулярным несимметричным вихреобразованием: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1986. – 261с.

32 Бекибаев Н.С., Волненко А.А., Сыдыков Ж.Е. Закономерности обтекания системы цилиндрических тел // Проблемы естественно-технических наук на современном этапе: сб. науч. трудов. - Бишкек, 2002. - С.46-49.

33 А.с. 1163516 СССР, МКИ В 01 D 53/20. Тепломассообменный аппарат / Петин В.Ф., Волненко А.А., Балабеков О.С. и др. (СССР). – 6с.: ил.

34 Сарбасов А.С. Гидродинамика и тепломассообмен в аппарате с регулярной подвижной игольчатой насадкой автореферат : дис. ... канд. техн. наук. - Тамбов: Ин-т химического машиностроения, 1988. - 150 с.

35 Волненко А.А., Бишимбаев В.К., Хусанов Ж.Е., Серикулы Ж. Интенсификация процесса тепломассообмена в аппаратах с регулярной подвижной насадкой и методология их расчета // Химический журнал Казахстана, №4(35), 2011. - С.132-146.

36 Авт.свид. СССР №1098117 /Петин В.Ф., Волненко А.А., Балабеков О.С. и др. Аппарат с насадкой // Не публ.

37 Предварительный патент РК 4955, МПК В 01 J 19/32. Аппарат с насадкой / Волненко А.А., Сорокин В.Г., Балабеков О.С. и др. (Республика Казахстан) Опубл. 15.08.97., Бюл. № 3. – 4 с.

38 Предварительный патент РК 7601, МПК В 01 J 19/32. Аппарат с насадкой /Волненко А.А., Сорокин В.Г., Балабеков О.С. и др. (Республика Казахстан) Опубл.15.06.99.Бюл. №6 – 5с.: ил.

39 Пред. патент РК №17434 Аппарат с насадкой /Исмаилов Х.Б., Ескендиоров М.З., Волненко А.А., Балабеков О.С., Исмаилов Б.Р. (Республика Казахстан) Опубл.15.06.06.Бюл. №6. – 4с.: ил.

40 А.с. 11500353 СССР, МКИ В 01 D 53/20. Аппарат с насадкой / Волненко Опубл.15.08.89.Бюл. №30. – 5с.

41 Патент № 1478 Республика Казахстан, МКИ В01D 53/20. Аппарат с насадкой / А.А. Волненко [и др.]; опубл. 15.12.94, Бюл. № 4 – 5 с.

42 Пред. патент РК №8045 Теплообменный аппарат /Есенов Т.С., Волненко А.А., Бекибаев Н.С., Серманизов С.С., Балабеков О.С., Сейтханов Н.Т. (Республика Казахстан) Опубл.15.10.99.Бюл. №10. – 5с.

43 Инновационный патент №20069 Республика Казахстан, МПК В01D 53/20, В01D 47/14. Аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания / Л.И. Раматуллаева, А.А. Волненко, Ж.Е. Хусанов; опубл. 15.09.08, Бюл. №9. – 4 с.

44 Волненко А.А. Научные основы разработки и расчета вихревых массообменных и пылеулавливающих аппаратов: дис. ... докт. техн. наук. – Шымкент, 1999. -300с.

45 Бекибаев Н.С. Научные основы сопряженных тепло- и массообменных процессов в синфазно-вихревых аппаратах: дис. ... докт. техн. наук. Шымкент. 2008. - 240с.

46 Балабеков О.С., Балтабаев Л.Ш., Тарат Э.Я. и др. Разработка и исследование массообменного аппарата с колеблющейся насадкой // Тезисы докладов научно-технической конференций, посвященной 50 летию образования СССР. – Чимкент, 1972.- С.148-153.

47 Сабырханов Д.С. Разработка, расчет и внедрение массообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой: автореф. докт. техн. наук.– Шымкент, 1996- 30 с.

48 Бекибаев Н.С. Гидродинамика и массообмен в аппарате с регулярной подвижной пластинчатой насадкой: дис. ...канд. техн. наук. – Минск, 1987. – 246 с.

49 Горбунов В.А. Очистка газов фосфорных производств от пыли в комбинированных аппаратах с регулярной подвижной насадкой: автореф. дис. ... канд. наук. – Чимкент, 1991. -19 с.

50 Сейтханов Н.Т. Структура потоков и контактный теплообмен в аппарате с регулярной пластинчатой насадкой: дис....канд. техн. наук. – Шымкент, 2002. -107 с.

51 Серикулы Ж. Разработка и расчет теплообменных аппаратов с подвижной насадкой с учетом масштабного перехода: дис. ... доктора PhD. – Шымкент. 2015. -141 с.

52 Сарсенбекулы Д. Методология расчета и проектирования аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры: дис. ... доктора PhD. – Шымкент. 2017. -143 с.

53 Волненко А.А., Балабеков О.С., Жумадуллаев Д.К., Ешжанов А.А. Расчет гидравлического сопротивления поверхностных кожухотрубчатых теплообменников // Междунар. науч.-практ. конф. «Путь Казахстана: 25 лет мира и создания с лидером нации» посвященной 25 летию независимости Республики Казахстан. - Шымкент: ЮКГУ им.М.Ауэзова, 2016. – С.174-177.

54 Zhumadullaev D.K., Volnenko A.A., Levdanskiy A.E., Yeshzhanov A.A. Surface shell-and-tube exchangers tube side hydraulic friction calculation // International Conference of Industrial Technologist and Engineering (ICITE 2017). - Shymkent, 2017. – P. 173-178.

55 Жумадуллаев Д.К., Ешжанов А.А., Волненко А.А. Расчет гидравлического сопротивления межтрубного пространства кожухотрубчатого теплообменника с учетом вихревого движения теплоносителя // Междунар. науч. конф. «Интеллектуальный потенциал XXI века '2018». – Одесса, 2018. – С. 38-44.

56 Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976. – 656 с.

57 Лукьяненко Т.В., Никишин П.А., Скрынник Ю.Н. и др. Методика определения коэффициента массоотдачи при испарении воды в поток воздуха на контактных устройствах // Очистка промышленных выбросов и утилизация отходов: Межвуз. сб. научн. трудов. – Л., 1985. – С.146 – 149.

58 Якушенко С.И., Никишин П.А. Методика исследования процесса массоотдачи и брызгоуноса на крупномасштабных стендах // Тез. докл. Выездного засед. научн.-техн. комиссии по массооб. колон. аппаратуре ГКНТ СССР. – Ангарск, 1985. – С.28 – 30.

59 Перри Джон Г. Справочник инженер-химика. – Л.: Химия, Ленингр. отделение, 1969. – т.1. – 639с.

60 Кастальский А.А., Минц Д.М. Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения. – М.: Высшая школа, 1962. – 494с.

61 Андреев Е.И. Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985.- 192с.

62 Ешжанов А.А., Волненко А.А., Левданский А.Э., Корганбаев Б.Н. К расчету эквивалентного диаметра комбинированной регулярно-взвешенной насадки. // Известия НАН РК. Серия химии и технологии. – Алматы, 2018. - №1(427). – С.87-91.

63 Зайцев И.Д., Ткач Г.А., Стоев Н.Д. Производство соды. – М.: Химия, 1986. – 312с.

64 Yeshzhanov A., Volnenko A., Zhumadullayev D., Abzhapbarov A., Sarsenbekuly D., Levdansky A. Operating-design parameters analysis and hydraulic resistance calculation of vortex packed layer structure apparatus // Industrial Technology and Engineering. №1(30), 2019.– P.48-55.

65 Ешжанов А.А., Волненко А.А., Жумадуллаев Д.К., Сарсенбекулы Д. Результаты исследований режимов работы аппаратов с регулярной и

взвешенной насадкой // Междунар. науч.-практ. конф. «АУЭЗОВСКИЕ ЧТЕНИЯ - 16: «Четвертая промышленная революция: Новые возможности модернизации Казахстана в области науки, образования и культуры» Шымкент: ЮКГУ им.М.Ауэзова, 2018, т.9 – С.23-28.

66 А. Ешжанов, А. Волненко, А. Торский, Д. Жумадуллаев, А. Абжапбаров. Режимы работы аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой // Вестник КазНУ – 2019. - №2(132).- С.396-401.

67 Balabekov O.S., Volnenko A.A., Korganbaev B.N., Sarsenbekuly D. Purification apparatus uses with types of regular packings for chromium salts production // Chemical engineering transactions. - 2015. - Vol.43, – P.1147-1152.

68 Zhumadullaev D.K., Volnenko A.A., Sarsenbekuly D., Levdanskiy A.E., Merekeyeva A.Zh., Yeshzhanov A.A. Computation of hydraulic resistance of hollow beam of the enthalpy exchanger with knurled pipes and flow core energizer // International Conference of Industrial Technologist and Engineering (ICITE 2016), Shymkent, Kazakhstan, October 28-29, 2016. – P.74-78.

69 Волненко А.А., Левданский А.Э., Крганбаев Б.Н., Жумадуллаев Д.К., Ешжанов А.А., Сарсенбекулы Д. Расчет гидравлического сопротивления теплообменного аппарата с трубчатым пучком регулярной структуры //Тр. междунардн. научно-практич.конф. «Взаимосвязь науки, образования и практики». Шымкент: Международный гуманитарно-технический университет, 2017. – С.174-178.

70 Жумадуллаев Д.К., Ешжанов А.А., Волненко А.А., Левданский А.Э. Единый подход к расчету гидравлического сопротивления трубчатого пучка смесительного и поверхностного теплообменников. // Известия НАН РК. Серия химии и технологии. – 2018. - №1(427).- С.93-99.

71 Serikuly Zh., Volnenko A., Kumisbekov S. Mass transfer in the apparatuses with preformed packing bodies // International Review of Mechanical Engineering (IREME), Vol.8, №4, 2014.- P. 779 – 784.

72 Ешжанов А.А., Волненко А.А., Жумадуллаев Д.К., Левданский А.Э. Расчет количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя в аппарате с регулярно-взвешенной насадкой // Междунар. науч.-практ. конф. «АУЭЗОВСКИЕ ЧТЕНИЯ - 16: «Четвертая промышленная революция: Новые возможности модернизации Казахстана в области науки, образования и культуры» Шымкент: ЮКГУ им.М.Ауэзова, 2018, т.9 – С.18-23.

73 Волненко А.А. Методология разработки и методика расчета аппаратов с регулярной подвижной насадкой // Вестник НАН РК. - 1999. -№3. - С.56-62.

74 Серикулы Ж., Волненко А.А., Кумисбеков С.А., Кениг Е. Исследование количества удерживаемой жидкости и газосодержания аппаратов с различным типом регулярной насадки // Тр.межд.науч.-практ.конф. «Развитие науки, образования и культуры независимого Казахстана в условиях глобальных вызовов современности», посвященной 70-летию ЮКГУ им.М.Ауэзова, т.4, 2013.- С.118-121.

75 А.А. Yeshzhanov, А.А. Volnenko, D. K. Zhumadullayev, А.Е. Levdanskiy. Calculation of the structural components of a gas-liquid layer in the apparatus with a

regularly-suspended packing // V International Conference of «Industrial Technologist and Engineering» (ICITE 2018) dedicated to the 75TH anniversary of M.Auezov South Kazakhstan state university and 90TH anniversary of Academician S.T. Suleimenov holding within 4.0 Industrial Revolution, Shymkent, Kazakhstan, October 28, 2018, т.3. – P.258-263.

76 Ешжанов А.А., Жумадуллаев Д.К., Волненко А.А. Расчет структурных составляющих газожидкостного слоя в аппаратах с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой // Технические науки: Проблемы и решения. Сб. статей по матер. XVIII международн. научно-практ.конф. № 12 (16), Москва, Декабрь 2018 г. – С.165-171.

77 Волненко А.А., Серикулы Ж., Сарсенбекулы Д. Механизм дробления пленок жидкости в слое регулярной насадки на капли и их расчет // Вестник МКТУ им. Х.А.Ясави.- 2012, №3(78). - С. 76- 82.

78 Балабеков О.С. Физико-химическая гидродинамика и закон о синфазности вихреобразования. – Шымкент, 2001.- 277 с.

79 Волненко А.А., Серикулы Ж., Сарсенбекулы Д. Расчет толщины пленки, диаметра струй и капель в аппаратах с регулярной подвижной насадкой / Вестник МКТУ им. Х.А.Ясави.- 2012.- №3(78). - С.87- 92.

80 Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматгиз, 1959.– 699 с.

81 Балабеков О.С., Шарыгин М.П., Мусин Н.А. Механизм образования капли в трехфазном реакторе // Химические реакторы (Теория, моделирование, расчет).- Чимкент, 1983, Т.1.- С.379-384.

82 Brauer H. Deformations-Turbulenz bei Fluiden Partikein // Chem.-Ing.-Tech. 51. – 1979. - Nr. 10. - P. 934 – 948.

83 Пери Д.Г. Справочник инженера - химика. Пер. с англ. / Под ред. Н.М. Жаворонкова и П.Г. Романкова – Л.: Химия,1969, Т. 1. - 784с.

84 Коган В.Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии. – Л.: Химия, 1977. - 592 с.

85 Прандтль Л. Гидроаэромеханика. 2-е изд. Пер. с нем. – М. - Л.: Энергия. – 1951. - 575 с.

86 Балабекова М.О. Пульсационные характеристики газожидкостного слоя на крупноперфарированной противоточной тарелке и их влияние на интенсивность массоотдачи. Дис. ... канд. техн. наук. Шымкент. 2002.- 148с.

87 Ешжанов А.А., Жумадуллаев Д.К., Волненко А.А. Расчет частотных характеристик при вихревом движении газожидкостного потока в рабочей зоне трубчатой насадки // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований. Сб. ст. по материалам X междунар. науч.-практ.конф. №10(7). Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2018. – С. 74-77.

88 A.A. Yeshzhanov, A.A. Volnenko, D.K. Zhumadullayev, A.E. Levdanskiy, D. Sarsenbekuly. Heat transfer characteristics and calculation of heat transfer coefficients in the apparatus with a regular-suspended packing // V International Conference of «Industrial Technologist and Engineering» (ICITE 2018) dedicated to the 75TH anniversary of M.Auezov South Kazakhstan state university and 90TH

anniversary of Academician S.T. Suleimenov holding within 4.0 Industrial Revolution, Shymkent, Kazakhstan, October 28, 2018, т.3. – P.263-268.

89 Аэров М.Э., Годес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы. Л.: Химия, 1979. – 145с.

90 Brahm D., Prosner. Ctas Absorbtion in to Turbulent Liquid //Chemical Engineering Science. 1973, v. 28, №5. - P.12-30.

91 Кафаров В.В. Основы массопередачи. – М.: Высшая школа, 1972. – 496с.

92 Берд Р., Стюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. - М.: Химия, 1974.- 688с.

93 Балабеков О.С. Гидродинамика, массообмен и пылеулавливание при противоточных и прямоточных двухфазных капельных и пленочных течениях в слое подвижной насадкой: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.. 1985.- 40с.

94 Айтбаев Е.А., Балабекова М.О., Тапалов Т.Т. О средней высоте газожидкостного слоя в аппаратах с крупноперфорированными противоточными тарелками // Труды научной конференции “История и современность”, посвящ. 55-летию Победы в Великой Отечественной войне. – Шымкент, 2000. – С. 90 – 93.

95 Сарсенбекулы Д., Балабеков О.С., Волненко А.А., Жумадуллаев Д.К. Гидравлическое сопротивление и теплообмен при движении теплоносителя в трубном пучке регулярной структуры // Известия НАН РК. Серия Химии и Технологии. - 2016. -№1. - С.38-43.

96 Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. - Энергия, 1977. – 344 с.

97 Боровик А.А., Протасов С.К. Процессы и аппараты химической технологии. Сборник примеров и задач: в 2ч. учебное пособие. – Минск: БГТУ, 2013. – Ч.2.- 419 с.

98 Петухова Б.С., Шикова В.К. Справочник по теплообменникам: в 2 т. / Пер. с англ., под ред. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – Т.1.- 560 с.

99 Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

100 Какорин О.Я. Установка кондиционирования воздуха. Основы расчета и проектирования. - М.: Машиностроение, 1971. - 344с.

101 Zhumadullayev D.K., Volnenko A.A., Sarsenbekuly D., Yeshzhanov A.A. Intensification of the heat exchange in the pipes of mixing and surface heat exchangers // International Review of Mechanical Engineering (IREME) (Великобритания) Vol 12, No 3 (2018). - P. 279-284.

102 Коузов П.А., Мыльников С.И. Сравнительная оценка и рекомендации унификации мокрых пылеуловителей //Сб. научн. трудов институтов охраны труда ВЦСПС. – М.: Профиздат, 1971. Вып. 74. С.17 – 23.

103 Коузов П.А. Пылеподатчик ЛИОТ //Сб. научн. трудов институтов охраны ВЦСПС. – М.: Профиздат, 1969. Вып. 60. - С.3 – 12.

104 А. Ешжанов, А. Волненко, Ж. Хусанов, А. Торский, Д. Жумадуллаев. Пылеулавливание в аппарате с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой // Вестник КазНИТУ – 2019. - №2(132).- С.69-74.

105 Шарыгин М.П. Разработка и расчет устройств для разрушения отложений и пылеулавливания с управляемым вихревым потоком: Дис. ... докт. техн. наук. – М.: 1992. – 480с.

106 Очистка промышленных газов от пыли /В.Н.Ужов, А.Ю.Вальдберг, Б.И.Мягков, И.К.Решидов. – М.: Химия, 1981. – 390с.

107 Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: АН СССР, 1955. – 352с.

108 Аэрозоли – пыли, дымы и туманы /Грин Х., Лейн В; Под ред. Н.А.Фукса. – Л.: Химия, 1969. – 428с.

109 Алиев Г.М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: справ.изд. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

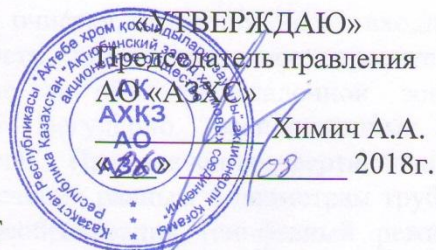
110 Систер В.Г., Мартынов Ю.В. Исследование процесса сепарации жидких капель в винтовом канале // Теор. осн. хим. технол. – 1993. – Т.27, №3. – С.264-269.

111 Волненко А.А., Левданский А.Э., Корганбаев Б.Н., Жумадуллаев Д.К., Ешжанов А.А., Сарсенбекулы Д. Промышленные испытания и внедрение аппарата с трубчатой насадкой в производстве окиси хрома //Тр. международн. научно-практич.конф. «Взаимосвязь науки, образования и практики». Шымкент: Международный гуманитарно-технический университет, 2017. – С.171-174.

112 Ешжанов А.А., Волненко А.А., Жумадуллаев Д.К., Абжапбаров А. А., Сарсенбекулы Д. Промышленные испытания и внедрение аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой в производстве монохромата натрия // Сборник статей по материалам XXII международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения». № 4 (20) Москва, апрель 2019. – С.132-138.

113 Авербух Т.Д., Павлов П.Г. Технология соединений хрома. – Л.: Химия, 1967. - 376 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



АКТ

промышленных испытаний аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой в схеме окислительного обжига шихты в производстве монокромата натрия (производство монокромата натрия ПМН-1, цех №2).

Производство монокромата натрия состоит из следующих стадий технологического процесса:

- 1 подготовка сырьевых материалов;
- 2 приготовление шихты;
- 3 окислительный обжиг шихты;
- 4 выщелачивание спека;
- 5 фильтрация шламовой пульпы;
- 6 очистка монокромата натрия от примесей;
- 7 сушка шлама.

Для проведения окислительного обжига шихты используется хромитовая руда (основным рудообразующим материалом в них является хромшпендилит) и кальцинированная сода. Окислительный обжиг хромитовой руды проводят во вращающихся барабанных печах при температуре 1200-1300⁰С. Печь нагревается газами, полученными при сжигании природного газа. Длина печей 55 м, наружный диаметр 2,8 м. Печи установлены на 4-х роликовых опорах наклонно, угол наклона 3%, скорость вращения печи – 1,33 об/мин. Печи внутри футерованы шамотным кирпичом. Для уменьшения пылеуноса в верхнем конце печи монтируется порог из нержавеющей стали, для увеличения времени пребывания материала (спека) в зоне высоких температур на выходе из печей предусмотрен порог из шамотного кирпича.

Газы, выходящие из прокалочных печей, уносят до 60% тепла и имеют температуру 550-650⁰С. Для рекуперации тепла отходящих газов используются котлы-утилизаторы типа КУ-50, в которых тепло отходящих газов используется для получения пара с давлением 1,2 МПа. Осаждающаяся пыль в котлах-утилизаторах собирается в бункерах, из которых транспортируется в бункер пыли на приготовление шихты.

В существующей схеме очистки газа перед выбросом в атмосферу они проходят очистку в электрофильтрах ТС-6. На выбросе в атмосферу газы имеют температуру в пределах не более 150⁰С.

Для дальнейшего снижения температуры газового потока и снижения пылевой нагрузки предложено перед электрофильтром установить аппарат с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой. Работа такого аппарата происходит следующим образом.

Газовый поток, поступающий на очистку, подается через входной штуцер. Взаимодействие газа и жидкости, подаваемой через ороситель, происходит в противоточном режиме в объеме насадочной зоны, представляющей собой пучок труб регулярно расположенных в вертикальном и радиальном направлениях. При значениях вертикальных шагов (для труб круглого поперечного сечения равным 4 диаметрам трубы) создается режим одновременного вихреобразования (синфазный режим) взаимодействия вихрей, образующимися за трубами. В результате такого взаимодействия суммарная мощность вихрей увеличивается, что позволяет совершить большую работу по дроблению орошающей жидкости и созданию высокоразвитой межфазной поверхности.

В трубном пучке движется теплоноситель, подача которого осуществляется по схеме входной патрубков – коллектор – трубы – коллектор – выходной штуцер, далее нижерасположенные слои труб и вывод теплоносителя через патрубков.

Очищенный газовый поток выводится из аппарата через верхний патрубков, а отработанная жидкость стекает через нижний штуцер.

Установка конусных опорно-распределительных решеток с расположенными на ней дискретными контактными элементами (резиновыми шарами) позволяет обеспечить незабываемость внутренних элементов контактной зоны. Это достигается тем, что при рабочих скоростях газового потока происходит взвешивание контактных элементов и их движение от центральной части аппарата к его краям. При этом контактные элементы соударяются с трубами, стенками аппарата и между собой, что приводит к очищению их поверхности. Кроме этого, соударения приводят к дополнительному дроблению жидкости, вызывая увеличение межфазной поверхности.

Выполнение опорно-распределительных решеток конусными позволяет существенно снизить нижний диапазон рабочих скоростей газа. Если в аппарате с плоской опорно-распределительной решеткой начало взвешивания контактных элементов происходит при скорости газа около 4 м/с, то в аппарате с конусными опорно-распределительными решетками 1,5 м/с. Это позволяет обеспечить рабочий режим аппарата при значительно меньших энергозатратах.

Во время испытания, проводимых совместно сотрудниками ЮКГУ им. М.Ауэзова и АО «АЗХС», получены данные, представленные в таблице 1.

Замеры основных параметров газового потока при прохождении газоочистного оборудования показали, что:

До котла утилизатора

- температура газа 815-823⁰С;

- давление (-680-750) Па;

- расход газа 27100-27980 нм³/ч.

После аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой

- температура газа 158-170⁰С;

- давление (-805-840) Па;
 - расход газа 28350-29220 $\text{нм}^3/\text{ч}$;
 - концентрация пыли 0,310-0,930 $\text{г}/\text{нм}^3$.
- Эффективность очистки составила 97-98,6%.

После электрофилтра

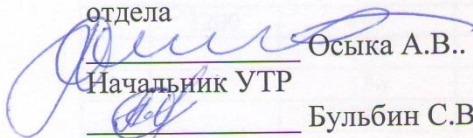
- температура газа 124-130 $^{\circ}\text{C}$;
- давление (-890-950) Па;
- расход газа 28350-29220 $\text{нм}^3/\text{ч}$;
- концентрация пыли 0,006-0,018 $\text{г}/\text{нм}^3$.

В результате проведенных испытаний подтверждена высокая эффективность проведения процесса газоочистки и значительная интенсификация процесса теплообмена в аппарате с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой.


Акт подписали:

От АО «АЗХС»

Начальник Производственного
отдела


Осыка А.В.

Начальник УТР

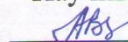

Бульбин С.В.

Начальник ПЭО


Чуянова А.В.

от ЮКГУ им. М.Ауэзова

Научный руководитель

 д.т.н., проф. А.А.Волненко

Исполнители:

 А.А. Ешжанов

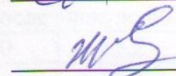
 Д.К. Жумадуллаев

Таблица 1 - Результаты промышленных испытаний аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой в схеме окислительного обжига шихты в производстве монокромата натрия (производство монокромата натрия ПМН-1, цех №2).

№ п/п	Диаметр газохода, мм	Температура, °С	Давление, Па	Скорость в газоходе, м/с	Производительность, нм ³ /ч	Концентр. пыли, г/нм ³
Вход до котла утилизатора						
1.	1200	815	-710	14,8	28400	18,6
2.		820	-700	15,1	27980	19,3
3.		815	-750	14,7	27100	16,1
4.		823	-680	15,3	27650	15,5
Выход после аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой						
1.	1200	170	-810	15,2	29100	0,930
2.		163	-805	15,1	29220	0,579
3.		165	-840	14,7	28350	0,483
4.		158	-790	15,3	28730	0,310
Вход до электрофильтра						
1.	1200	164	-840	15,3	39110	0,927
2.		158	-800	15,4	40220	0,576
3.		156	-850	14,8	38380	0,480
4.		147	-800	15,6	38770	0,307
Выход после электрофильтра						
1.	1200	124	-950	15,2	48840	0,018
2.		125	-900	17,1	51500	0,012
3.		124	-950	14,7	44000	0,014
4.		130	-890	16,0	47390	0,006

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



АКТ ВНЕДРЕНИЯ аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой

ЗАКАЗЧИК – АО «Актюбинский завод хромовых соединений»

НАСТОЯЩИМ АКТОМ ПОДТВЕРЖДАЕТСЯ, что результаты работы
«Разработка и внедрение низкоэнергоемких и высокоэффективных тепло-
массообменных и газоочистных аппаратов для процессов теплообмена и
газоочистки».

ВЫПОЛНЕННОЙ В Южно-Казахстанском государственном университете им.
М.Ауэзова.

ВЫПОЛНЯЕМОЙ в период с 3.01.18 г. по 31.07.18 г.

ВНЕДРЕННЫ на АО «Актюбинский завод хромовых соединений».

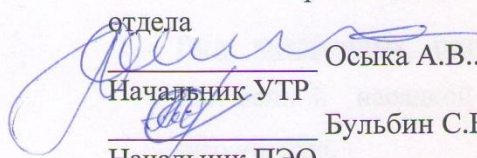
1. Вид внедренных результатов: аппарат с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой для проведения процессов тепломассообмена и газоочистки.
2. Характеристика масштаба внедрения: единичное.
3. Форма внедрения: конструкция аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой.
4. Новизна результатов научно-исследовательских работ: качественно новое решение конструкции насадки в аппарате, заключающееся в комбинировании

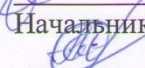
регулярной трубчатой насадки и взвешенной шаровой насадки. Это позволило исключить образование отложений на трубчатой насадке и значительно повысить эффективность процессов теплообмена и газоочистки.

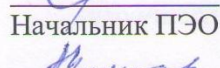
5. Опытно-промышленная проверка: промышленные испытания аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой, установленного в схеме окислительного обжига шихты производства монокромата натрия ПМН-1.
6. Внедрен: аппарат с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой в производство монокромата натрия ПМН-1 (цех № 2) и сдан в эксплуатацию с 6.08.2018 г.
7. Социальный и научно-технический эффект: снижение воздействия на окружающую среду вредных выбросов, улучшение и оздоровление условий труда.

Акт подписали:


От АО «АЗХС»
Начальник Производственного
отдела


Осыка А.В..

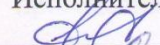
Начальник УТР

Бульбин С.В.


Начальник ПЭО

Чуянова А.В.

от ЮКГУ им. М.Ауэзова

Научный руководитель

д.т.н., проф. А.А.Волненко

Исполнители:


А.А. Ешжанов


Д.К. Жумадуллаев

ПРИЛОЖЕНИЕ В

«УТВЕРЖДАЮ»

Председатель правления
АО «Актюбинский завод
хромовых соединений»

Химич А.А.
«06» 2018г.

РАСЧЕТ

эффективности природоохранных мероприятий по защите атмосферы от загрязнений в схеме окислительного обжига шихты в производстве монохромата натрия (акт внедрения от 06.08.2018года).

Установление экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды осуществляется на основании «Правил экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды» [1].

Экономическая оценка ущерба косвенным методом от загрязнения атмосферного воздуха выбросами от стационарных источников и от сжигания газа на факелах, сверхустановленных нормативов по *i*-ому ингредиенту определяется по формуле:

$$U_i = (C_{\text{факт}i} - C_{\text{норм}i}) \times 3\,600/1\,000\,000 \times A_i \times T \times 2,2 \text{ МРП} \times 10 \times K_1 \times K_2 \quad (1)$$

где: U_i – экономическая оценка ущерба от загрязнения атмосферного воздуха от стационарных источников и от сжигания газа на факелах, *i*-ым ингредиентом, тенге;

$C_{\text{факт}i}$ – фактический выброс *i*-ого загрязняющего вещества, выявленный в ходе государственного либо производственного экологического контроля, г/сек;

$C_{\text{норм}i}$ – норматив выброса *i*-ого загрязняющего вещества, г/сек;

A_i – коэффициент относительной опасности, определяемый по формуле:

$A_i = 1/\text{ПДК}_{\text{сс}}$, где $\text{ПДК}_{\text{сс}}$ – предельно допустимая среднесуточная концентрация загрязняющего вещества в атмосферном воздухе;

T – время работы оборудования за период нанесения ущерба, принимаемое за время, прошедшее с последней проверки, проведенной в ходе государственного либо производственного экологического контроля (в часах);

МРП – месячный расчетный показатель, установленный законодательными актами на соответствующий финансовый год;

10 – повышающий коэффициент;

K_1 – коэффициент экологической опасности (определяется по приложению 1 [1]);

K_2 – коэффициент экологического риска (определяется по приложению 2 [1]).

Для существующей технологической схемы составляющие уравнения (1) имеют следующие значения (после котла утилизатора):

$C_{\text{факт}} = 139,24 \text{ г/сек}$; $C_{\text{норм}} = 0,601 \text{ г/сек}$; $A = 1/\text{ПДК}_{\text{сс}} = 66,7$ где $\text{ПДК}_{\text{сс}} = 0,015 \text{ мг/м}^3$ для пыли в пересчете на Cr(VI); $T = 7200 \text{ час}$; $\text{МРП}(2018) = 2405 \text{ тенге}$; $K_1 = 1$; $K_2 = 1$. Тогда после подстановки в уравнение (1) имеем экономическую оценку ущерба:

$$U_1 = (139,24 - 0,601) \times 3\,600 / 1\,000\,000 \times 66,7 \times 7200 \times 2,2 \times 2405 \times 10 \times 1 \times 1 = 12681890815,2 \text{ тенге}$$

После аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой в схеме окислительного обжига шихты в производстве монокромата натрия происходит снижение концентрации выбрасываемой пыли в окружающую среду $C_{\text{факт}} = 4,608 \text{ г/сек}$ (акт промышленных испытаний). В этом случае экономическая оценка ущерба составит:

$$U_2 = (4,608 - 0,601) \times 3\,600 / 1\,000\,000 \times 66,7 \times 7200 \times 2,2 \times 2405 \times 10 \times 1 \times 1 = 366537096,3 \text{ тенге}$$


Снижение концентрации выбросов пыли приводит к уменьшению экономического ущерба в 34,6 раз. Однако конечная концентрация пыли не соответствует нормативным требованиям, в связи с чем, в схеме предусмотрена очистка газового потока от пыли в электрофилт্রে (см. акт промышленных испытаний). Конечная концентрация пыли после очистки газового потока в электрофилт্রে составляет $C_{\text{ср}} = 0,05 \text{ г/нм}^3$, что ниже норматива ($C_{\text{норм}} = 0,075 \text{ г/нм}^3$).

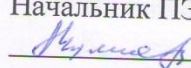
Литература

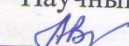
1 Об утверждении Правил экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды /Постановление Правительства Республики Казахстан от 27 июня 2007 года N 535

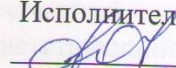
От АО «АЗХС»
Начальник Производственного
отдела

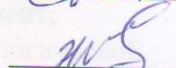

Осыка А.В.

Начальник УТР

Бульбин С.В.

Начальник ПЭО

Чуянова А.В.

от ЮКГУ им. М. Ауэзова
Научный руководитель

д.т.н., проф. А.А. Волненко

Исполнители:

А.А. Ешжанов


Д.К. Жумадуллаев

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Ф.7.07-14

Согласовано:
Проректор по НИР и И
Сатпаев М.И.
« 12 2018 г. »

Утверждаю
Проректор по У и УМР
Байболов К.С.
(Ф.И.О., подпись)
« 12 2018 г. »

АКТ

внедрения результатов научных исследований по диссертации Ешжанова А.А. на тему «Разработка и расчет тепломассообменного аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой» на соискание ученой степени PhD, выполненной в соответствии с госбюджетной НИР Б-16-05-01 «Разработка методики конструирования и расчета высокоэффективных тепломассообменных аппаратов и устройств общепромышленного назначения».

Настоящий акт составлен по итогам НИР, выполненной на кафедре «Технологические машины и оборудование» в 2016 – 2018г.г.

Настоящим актом подтверждается, что результаты НИР по созданию тепломассообменного аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой и методики расчета, выполненные докторантом Ешжановым А.А. под руководством д.т.н., проф. Волненко А.А. и д.т.н., доц. Левданского А.Э. внедрены в учебный процесс: в лекционные занятия по дисциплине «Современное промышленное оборудование» в разделе «Теплообменное оборудование»

(указывается наименование дисциплины и ее разделы)

в практические занятия по дисциплине «Современное промышленное оборудование» для выполнения расчетов по заданию «Расчет тепломассообменного аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой»

(указывается наименование дисциплины и ее разделы)

Научный руководитель темы
Волненко А.А.

Начальник отдела
технических наук НИУ
Серкебаев М.К.

И.о. директора ДАВ
Пернебеков С.С.

Директор НИУ
Назарбек У.Б.