

Южно-Казахстанский университет им. М.Ауэзова

УДК 66.02.071.7

На правах рукописи

СЕРИКОВ АБЛАЙ СЕРИКУҰЛЫ

**Гидродинамика и массообмен в аппарате с вихревым
взаимодействием потоков в условиях вращательного движения
насадочных элементов**

8D07180 - Технологические машины и оборудование

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

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

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

Республика Казахстан
Шымкент, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

	НОРМАТИВНЫЕ СЫЛКИ.....	4
	ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
	ВВЕДЕНИЕ.....	8
1	СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВОПРОСА ГИДРОДИНАМИКИ И МАССООБМЕНА В НАСАДОЧНЫХ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ АППАРАТАХ	13
1.1	Конструкции теплообменных аппаратов с нерегулярной (хаотической) стационарной насадкой и регулярной стационарной насадкой.....	13
1.2	Конструкции теплообменных аппаратов с регулярной подвижной насадкой	17
1.3	Методы расчета гидродинамических характеристик и параметров массообмена в аппаратах с регулярной подвижной насадкой.....	19
1.4	Постановка задач исследований.....	29
2	ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИК ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	31
2.1	Технологическая схема экспериментальной установки	31
2.2	Методики для проведения экспериментальных исследований	32
2.2.1	Методика исследования параметров движения насадочных элементов.....	32
2.2.2	Методики исследования гидродинамических характеристик	33
2.2.3	Методики исследований коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах.....	33
3	ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ НАСАДКИ В АППАРАТЕ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ НАСАДОЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ.....	37
3.1	Конструкция аппарата с вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и расчет конструктивных параметров насадки.....	37
3.2	Частота вращения насадочных элементов и их расчет.....	43
3.3	Гидродинамические закономерности взаимодействия газовой и жидкой фаз и расчет основных гидродинамических характеристик....	46
3.4	Структура потоков и расчет структурных составляющих жидкой фазы.....	54
4	МАССООБМЕН В АППАРАТЕ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ НАСАДОЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ.....	61
4.1	Влияние режимных и конструктивных параметров на коэффициенты массоотдачи в газовой и жидкой фазах	61
4.2	Расчет коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах	65

5	РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОМЫШЛЕННЫХ АППАРАТОВ С РЕГУЛЯРНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ НАСАДКОЙ.....	70
5.1	Рекомендации по проектированию и эксплуатации аппаратов с регулярными вращающимися насадочными элементами и методика расчета.....	70
5.2	Внедрение технической документации «Рекомендации по проектированию и методика расчета теплообменного аппарата с регулярной вращающейся насадкой» в производствах хромовых соединений.....	72
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	77
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	79
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	88

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

СТ РК 2.21-2019 ГСИ РК Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерений;

СТ РК 2.4-2019 ГСИ РК Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения.

СТ РК 2.1-2018 ГСИ РК Метрология. Термины и определения;

СТ РК 2.3-2019 ГСИ РК Эталоны единиц величин. Основные положения, порядок создания, утверждения, хранения и применения;

СТ РК 2.15-2018 ГСИ РК Государственный метрологический контроль;

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 – поверхность m^2 ; коэффициент;
- a – удельная поверхность, m^2/m^3 ; коэффициент;
- B, b – коэффициент; ширина (характерный размер), м;
- D – диаметр, м; коэффициент диффузии, m^2/c ;
- d – размер (диаметр) насадки, капли, струи, м;
- E – константа Генри, Па;
- F – поверхность, m^2 ; сила Н;
- f – площадь, m^2 ;
- K, k – коэффициент;
- L, l – плотность орошения, $m^3/(m^2ч)$; длина, м;
- H – высота, м;
- h – размер, м;
- h_0 – количество удерживаемой жидкости (КУЖ), м;
- m_k – параметр;
- N – мощность, Вт;
- n – число оборотов, c^{-1} ;
- P – давление, Па;
- ΔP – гидравлическое сопротивление, Па;
- Q – расход, m^3/c ;
- R, r – радиус, м; газовая постоянная, Дж/(моль·град);
- S – площадь, m^2 ;
- t – шаг размещения элементов, м/м; время, с;
- U, u – скорость (относительная, истинная), м/с;
- V – объемный расход (производительность), m^3/c ; объем, m^3 ;
- Э – энергия диссипации, Вт/кг;
- W – скорость, м/с;
- x – влагосодержание, кг/кг;
- α – угол, град; коэффициент;
- β – коэффициент массоотдачи, м/с; угол, град;
- γ – удельный вес, Н/ m^3 ;
- δ – толщина, м;
- ε – порозность;
- θ – коэффициент, учитывающий степень взаимодействия вихрей;
- λ – коэффициент трения; расстояние, м;
- μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; коэффициент;
- ν – коэффициент кинематической вязкости, m^2/c ; скорость, м/с;
- ξ – коэффициент сопротивления;
- ρ – плотность, кг/ m^3 ;
- σ – поверхностное натяжение, Н/м;

τ – время, с;
 φ – газосодержание, м³/м³;
 ψ – координата;
 ω – частота вращения, с⁻¹;

Числа:

$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu} \text{ – Рейнольдса;}$$

$$We = \frac{\rho W^2 d}{\sigma} \text{ – Вебера;}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \text{ – Шмидта;}$$

$$Sh = \frac{\beta_{rs} \cdot t_e}{D_r} \text{ – Шервуда.}$$

Индексы:

ап – аппарат;
в – вертикальный; вихрь;
вр – вращения;
вх – входящий;
вых – выходящий
г – газа; горизонтальный;
D – диффузионный;
д – динамический;
ж – жидкость;
к – конечная; капля;
кр – критический;
лоп – лопасть;
L – орошаемый;
м – молекулярный;
н – насадка;
об – обода;
пл – пленка;
р – радиальный;
с – сопротивление; сухой;
с – сечение;
сл – слой;
стр – струя;
ср – средний;
тр – труба; трение;
э – эжекция;
экв – эквивалентный;

яч – ячейка.

Аппараты:

ВН – со взвешенной насадкой;

ВПЛ – с вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями;

ПН – с подвижной насадкой;

РПН – с регулярной подвижной насадкой;

ФН – с фонтанирующей насадкой;

ЦН – с циркулирующей насадкой;

РПВКв – с регулярной подвижной вращающейся пластинчатой насадкой квадратной формы;

РПВКр - с регулярной подвижной вращающейся пластинчатой насадкой круглой формы.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка современного состояния решаемой научной проблемы. Анализ конструкций газоочистного оборудования, установленного на предприятиях различных отраслей промышленности, показывает большое разнообразие аппаратов, работающих на различных принципах действия в системе газ-жидкость. Сюда относятся пленочные и форсуночные аппараты, реализующие пленочный и распылительный механизмы взаимодействия потоков, традиционные насадочные и тарельчатые аппараты, имеющие барботажный режим взаимодействия фаз, аппараты ударно-инерционного и центробежного действия, реализующие ударный и центробежный механизмы осаждения твердых частиц, скрубберы Вентури, работающие в скоростном режиме движения газа и различного типа электрофилтры, использующие особенности создания электрического поля [1-7].

Основную долю аппаратов при проведении процессов тепломассообмена составляют насадочные и тарельчатые аппараты. Остановимся на насадочных тепломассообменных аппаратах.

В промышленности используются, которые в процессе развития действующих производств постоянно совершенствовались в направлении создания более совершенных конструкций. Из-за основного недостатка, присущего нерегулярным насадкам – повышенное гидравлическое сопротивление данные насадки в ряде случаев заменяются на регулярные стационарные насадки с гофрированной поверхностью и всевозможным рифлением, а также на сегментно регулярную рулонную насадку, регулярную насадку в виде зигзагообразной ленты, помещенной между вертикальными цилиндрическими перегородками и др. [8,9]. Используемые стационарные насадки работают только с чистыми газами и жидкостями.

В последние десятилетия известно о применении аппаратов с регулярной подвижной насадкой (РПН), в которых насадочные элементы равномерно с фиксированным шагом располагаются в вертикальном и радиальном направлениях в объеме контактной зоны. Имеются данные об успешном применении аппаратов РПН на предприятиях ЖФ ТОО «Казфосфат» (НДФЗ) и АО «Актюбинский завод хромовых соединений» [10-14].

Основанием для разработки темы явилось отсутствие результатов исследований модернизированной конструкции аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом и методики расчета.

Исходными данными к выполнению работы явились результаты исследований и методики расчетов аппаратов с регулярной подвижной вращающейся пластинчатой насадкой круглой (РПВКр) и квадратной (РПВКв) формы.

Обоснованием необходимости проведения научно-исследовательской работы послужила необходимость создания новых конструкций аппаратов с регулярной вращающейся насадкой с улучшенными техническими

характеристиками, получения экспериментальных данных для оптимизации режимно-конструктивных параметров и вывода расчетных зависимостей, составляющих основу инженерной методики расчета.

Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки. Разработка конструкции аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом основана на научных открытиях [15,16] в области механики газа и жидкости, базируется на фундаментальных теоретических положениях гидродинамики и тепломассообмена, что свидетельствует о высоком научно-техническом уровне разработки.

Сведения о патентных исследованиях. При создании конструкции аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом проведены патентные исследования по странам СССР и России, Казахстану, США, Франции, Германии, Великобритании, Японии на глубину свыше сорока лет. Результаты поиска свидетельствуют о том, что предлагаемая конструкция выгодно отличается от аналогов по таким показателям, как надежность в эксплуатации, энергопотребление, эффективность в процессах массообмена и теплообмена.

Сведения о метрологическом обеспечении научно-исследовательской работы. При написании диссертации использована 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 отвечающие «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. Процессы тепломассообмена и оборудование для их реализации широко используются на предприятиях химической, нефтеперерабатывающей, нефтехимической газоперерабатывающей, металлургической отраслей Казахстана. Изучение этих процессов является одним из научных направлений, проводимых в научной школе академика Балабекова О.С. по процессам и аппаратам химических технологий. При этом для исследования интенсификации процессов тепломассообмена используются два подхода - режимный и конструктивный.

Определяющими параметрами режимного подхода являются повышение скоростей потоков [17] и целенаправленное управление физико-химическими свойствами взаимодействующих фаз с целью повышения эффективности процессов тепло- и массопереноса [18].

Определяющими параметрами конструктивного подхода являются размеры, формы или расположение элементов контактного устройства. Он основан на научных открытиях, в которых благодаря научно обоснованному

выбору расстояний между турбулизирующими элементами, зависящих от их формы и размеров, можно при постоянной скорости потоков изменить режимы взаимодействия фаз. Примером реализации такой задачи является созданный класс аппаратов с регулярной подвижной насадкой [19] и крупнодырчатыми провальными тарелками. Дальнейшим развитием конструктивного подхода явилось создание теплообменных аппаратов, реализующих вихревое взаимодействие потоков при обтекании регулярно размещенных насадочных элементов, причем последние совершают вибрационные [20] или вращательные движения [21].

Нами для проведения процессов теплообмена разработаны конструкции аппаратов с регулярной вращающейся насадкой с горизонтальной [22] (Приложение А) и вертикальной (Приложение Б) осью вращения. В диссертационной работе приведены результаты исследований аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом [23]. Данная конструкция позволяет исключить недостатки ранее разработанных аппаратов [24], а именно быстрый износ струны в зоне контакта с вращающимися пластинчатыми элементами и беспрепятственный отброс жидкости к стенкам аппарата. Однако, результаты исследований аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом отсутствуют.

В связи с этим, проведение исследований гидродинамики и процессов массообмена, разработка методологии расчета, рекомендаций по их проектированию и эксплуатации являются актуальными.

Работа выполнялась в рамках проекта BR24992882 «Разработка новых технологий по переработке техногенных отходов с улучшением экологической обстановки в регионе», а также в соответствии с направлением исследований по госбюджетной НИР Б-21-01-05 ЮКУ им. М.Ауэзова «Разработка методики конструирования и расчета высокоэффективных теплообменных аппаратов и устройств общепромышленного назначения» на 2021–2025 гг.

Объект и предмет. Объектом исследования явилась лабораторная установка с аппаратом с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом.

Предметом исследований явились гидродинамические закономерности и массообменные характеристики.

Методологической базой явились методы физических исследований гидродинамических закономерностей и получения опытных коэффициентов массообмена в газовой и жидкой фазах.

Цель работы: разработка конструкции аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом, получение уравнений для расчета частоты вращения, гидродинамических характеристик и параметров массообмена, создание научно-обоснованных методов расчета, рекомендаций по эксплуатации и проектированию и внедрение технической документации в промышленности.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- изучение закономерностей взаимодействия газовой и жидкой фаз в контактной зоне регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом и получение расчетных зависимостей структурных составляющих жидкой фазы;

- экспериментальное исследование параметров движения насадочных элементов (частоты вращения), гидродинамических характеристик (гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости, газосодержания слоя) регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом при изменении режимных и конструктивных параметров и получение расчетных зависимостей;

- экспериментальное исследование массообменных характеристик (коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах) при изменении режимных параметров и получение расчетных зависимостей;

- разработка научно-обоснованной инженерной методики расчета разработанного аппарата и рекомендаций по проектированию и эксплуатации;

- внедрение технической документации в промышленности.

Научная новизна работы заключается в том, что на основе теоретических и экспериментальных исследований параметров вращения насадочных элементов, гидродинамических закономерностей и массообменных характеристик научно обоснована методология расчета аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом. При этом:

- принимая, что движение газа в объеме вращающейся насадки осуществляется по извилистым каналам, получены расчетные зависимости для определения порозности насадки в сечении аппарата, их объемной порозности, а также эквивалентного диаметра;

- исходя из баланса сил, действующих на прямоугольные лопасти вращающейся насадки получены уравнения для определения частоты ее вращения;

- исходя из выявленных закономерностей взаимодействия вихрей в объеме вращающихся насадочных элементов с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом получены уравнения для расчета коэффициентов сопротивления, гидравлического сопротивления и количества удерживаемой жидкости;

- предложен механизм дробления пленки жидкости, движущейся по прямоугольным лопастям и ободу во вращающемся насадочном элементе на струйки и капли с учетом вихревого механизма взаимодействия фаз, и исходя из анализа сил, действующих на структурные элементы жидкой фазы, получены уравнения для определения средних значений толщины пленки, диаметра струй и размера капель;

- на основе использования диссипативного подхода получены уравнения для определения коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах.

Практическая ценность работы. Разработаны конструкции теплообменных аппаратов, защищенные патентами РК [22,23].

Разработаны методики расчета, рекомендации по проектированию и эксплуатации аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом для проведения процессов массообмена хорошо и плохо растворимых газов.

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 техническая документация «Рекомендации по проектированию и методика расчета тепломассообменного аппарата с регулярной вращающейся насадкой» (Приложение В), которая принята к использованию в производствах хромовых соединений на АО «Актюбинский завод хромовых соединений». Получены акт внедрения (Приложение Г) и справка (Приложение Д).

Результаты НИР по созданию аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом и методика расчета внедрены в учебный процесс для проведения лекционных и практических занятий по дисциплине «Аппараты с подвижной и регулярной насадкой для процессов тепломассообмена и пылеулавливания» (Приложение Е).

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 вращающейся насадки с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом, их объемной порозности, а также эквивалентного диаметра;
- уравнения для определения частоты вращения насадки с прямоугольными лопастями;
- уравнения для расчета коэффициентов сопротивления, гидравлического сопротивления и количества удерживаемой жидкости;
- уравнения для определения средних значений толщины пленки, диаметра струй и размера капель;
- уравнения для определения коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах.

1 СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВОПРОСА ГИДРОДИНАМИКИ И МАССООБМЕНА В НАСАДОЧНЫХ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ АППАРАТАХ

Для проведения процессов тепломассообмена на предприятиях химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, металлургической промышленности широкое распространение наряду с тарельчатыми получили насадочные газоочистные аппараты.

По типу насадочных элементов их можно классифицировать на нерегулярные (хаотические) стационарные насадки, регулярные стационарные насадки, подвижные насадки и регулярные подвижные насадки.

1.1 Конструкции тепломассообменных аппаратов с нерегулярной (хаотической) стационарной насадкой и регулярной стационарной насадкой

На начальном этапе создания насадочной аппаратуры в качестве насадки использовался кусковой кварц, кокс и адгезит [25]. Разработанная впоследствии насадка в виде колец Рашига явилась важным этапом в развитии насадочных аппаратов. Кольца выполнялись высотой равной их наружному диаметру. Материалом для изготовления служила керамика, фарфор, сталь, а в дальнейшем различные полимеры. В результате модернизации кольцевой насадки разработано большое количество других насадок, среди которых такие распространенные, как кольца Палля, кольца Ралу, кольца Бялецкого, Кольца Hiflow, HУ-РАК, кольца PSL и т.д. [9, с. 64; 26].

Конструкции нерегулярных насадочных элементов постоянно совершенствуются в направлении увеличения количества отогнутых элементов, модификации поверхности насадки различными турбулизирующими элементами или путем изменения соотношения высоты и ширины насадочного тела. В настоящее время известны модернизированные нерегулярные стационарные насадки CMR No2, Hiflow ring, VSP ring, Poll ring, INTALOX, NOR-PAC, Hackette, DINP AC, ENVIPAC [8, с.16; 27-29].

Миникольцевые насадки по сравнению с кольцевыми насадками отличаются меньшим отношением высоты элемента насадки к её диаметру. К миникольцевым насадкам относятся насадки R-Pac, Glitsch 304, CMR ring, Glitsch CMR ring, McPac ring, миникольцевая насадка MICHM-X, насадка в форме колец Мёбиуса, миникольцевая насадка NT-1 и др. [9, с.67; 30-32]. При этом, во время заполнения аппарата миникольцевой насадкой, наблюдается тенденция преимущественно вертикальной самоориентации элементов насадки в аппарате (когда оси элементов кольцевых насадок вертикальны или составляют с вертикалью небольшой угол). Такая ориентация миникольцевых насадок в пространстве позволяет уменьшить количество застойных зон в контактном аппарате и более полноценно использовать всю поверхность насадочных тел.

Кроме кольцевых насадок, получила распространение также седлообразная насадка. Простейшая седлообразная насадка представляет собой четверть тонкостенного тора [9, с.69]. Развитие данного типа насадок пошло по

пути оснащения элементов насадок перфорацией, рифлением, и уменьшение толщины стенок за счет использования пластмассы в качестве материала (вместо керамики). Седлообразные насадки из металла в поперечном сечении представляют собой полукольца с перфорацией, а в ряде случаев с отогнутыми лепестками, выдавленными дугами и т.д. К седлообразным насадкам относятся насадки Super saddle, Hiflow saddle, Intalox Saddle, Nutter ring, RMSR metal, Interpack, Metal conjugated ring [8, с.17; 9, с.69].

Отдельно можно выделить конструкции нерегулярных насадок, разработанных Инженерно-внедренческим центром «Инжехим», образованных двумя, тремя или четырьмя изогнутыми полосами, смещенными относительно друг друга [33-38]. Края насадки изогнуты для исключения плотного прилегания отдельных элементов друг к другу. Особенностью данной конструкции является то, что жидкость, омывающая элементы насадки, сходит преимущественно с них в виде пленки. Это происходит за счет того, что геометрия насадки имеет гладкий гидравлический профиль и не содержит ломаных поверхностей и торчащих деталей, которые могли бы быть центром образования отдельных капель и струй. Пленочный характер стока жидкости с элементов насадки обеспечивает достаточно высокие массообменные характеристики при минимальном значении уноса и способствует снижению гидравлического сопротивления. Геометрия насадки такова, что контакт ее соседних элементов имеет почти точечный характер, что препятствует блокированию поверхности насадки и образованию застойных зон, которые могут возникнуть при контакте поверхностей с большим радиусом кривизны. Это особенно важно в случае присутствия в газовой и жидкой фазах примесей, склонных к полимеризации и образованию слоя твердых отложений на поверхности насадки. В этом случае уменьшаются свободное сечение колонны, свободный объем и удельная поверхность насадки, что приводит к ухудшению ее рабочих характеристик.

Насадки «Инжехим» изготавливаются из листа с искусственной шероховатостью, что увеличивает механическую прочность элементов. Наличие шероховатости способствует большей турбулизации стекающей пленки жидкости, а это, в свою очередь, ведет к повышению коэффициентов массоотдачи в жидкой фазе. Кроме того, наличие шероховатости поверхности приводит к увеличению количества удерживаемой жидкости, что особенно важно при проведении процессов с небольшой плотностью орошения. В то же время это практически не сказывается на гидравлическом сопротивлении насадки. Достаточно несложная конструкция насадки позволяет изготавливать ее методом листовой штамповки, что снижает себестоимость ее изготовления.

Конструкция нерегулярной насадки «Инжехим-2002» образована тремя изогнутыми полосами, смещенными относительно друг друга. Края насадки изогнуты для исключения плотного прилегания отдельных элементов друг к другу. Достаточно несложная конструкция насадки позволяет изготавливать ее методом листовой штамповки, что снижает себестоимость ее изготовления. Конструкция нерегулярной насадки «Инжехим 2003-М» образована четырьмя

изогнутыми полосами, попарно через одну смещенными относительно друг друга [9, с.80].

Существуют и другие насадки, которые нельзя однозначно отнести к тому или иному типу насыпных насадок. К ним можно отнести насадки в форме винтовых поверхностей, розетку Теллера и схожие с ней по конструкции насадки Dinpack, Snowflake, Starpak, насадки в виде полых шаров, например Хакетте, Топ-Пак, Polyhedral hollow ball [8, с.14] и др.

История создания регулярной стационарной насадки началась тогда, когда кольцевую насадку – кольца Рашига, кольца Палля стали укладывать в контактной зоне аппарата правильными рядами. При этом образуется совокупность вертикальных каналов, открытых для прохода газа, и сводится к минимуму количество зон, в которых может происходить задержка жидкости. К одним из первых регулярных насадок можно отнести плоскопараллельную насадку [39] и хордовую насадку [8, с.,15]. Плоскопараллельная насадка представляет собой вертикально устанавливаемые в контактный аппарат с небольшим зазором друг относительно друга металлические листы. Хордовая насадка представляет собой доски, устанавливаемые в аппарат вертикально, но, как правило, в несколько ярусов, каждый из которых повернут на угол, относительно соседних по высоте ярусов [40, 41].

Для увеличения интенсивности тепломассообмена в газожидкостных контактных аппаратах химической промышленности потребовалось увеличение удельной поверхности насадок. Так появились регулярные насадки с гофрированной поверхностью и всевозможным рифлением. В качестве материала стали применять сталь. Для лучшего перераспределения жидкости в слое насадки и уменьшения застойных зон, элементы насадки стали оснащать отверстиями, щелями, пазами и т.д. В настоящее время, широко используются в промышленности насадки из гофрированных под углом к вертикали пластин. К таким насадкам можно отнести насадки Koch IY [42], насадки Mellapak, Montz A1, Montz A2, Montz A3, Montz B1 и т.д. [8, с.16].

Инженерно-внедренческим центром «Инжехим» разработаны сегментно регулярная рулонная насадка «Инжехим» [9, с.80], в которой использована сдвоенная лента, одна из которых имеет гофры треугольной формы, на сторонах гофров выполнены лепестки в виде круговых сегментов, при этом хорды сегментов смежных сторон гофров расположены под углом друг к другу; регулярная рулонная гофрированная насадка состоит из пакетов, набранных из гофрированных листов и установленных один над другим слоями, отличается тем, что центральный пакет в слое выполнен в виде цилиндра, а остальные пакеты размещены в виде долей коаксиальных цилиндров, при этом гофры листов расположены под углом к горизонту, а в смежных листах пакета выполнены перекрестно; регулярная насадка IRG представляет собой пакет установленных вертикально гофрированных металлических пластин. Гофры пластин расположены под углом к горизонту. Пакет составляется таким образом, что гофры соседних пластин расположены перекрестно. На поверхности пластин созданы фигурные шероховатости в виде выпуклостей; регулярная насадка BIM

представляет собой пакеты гофрированных листов. Листы уложены в смежных слоях перекрестно, на поверхности листов выполнены микрогофры и лепестки [43,44].

Имеются сведения об исследованиях регулярной насадки (зигзагообразные ленты, помещенные между вертикальными цилиндрическими перегородками) для колонных массообменных аппаратов [45], пакетно-вихревой насадки ПВН, которая устроена по принципу улья, чьи ячейки образованы отдельными лепестками сложной формы [46], регулярная насадка с эффектом эжектирования [47], регулярной насадки из соплообразных элементов [48], структурированная насадка с треугольным и трапециевидным гофром [49].

Для большинства регулярных насадок поверхностью тепломассообмена является поверхность плёнки жидкости, а сама насадка представляет собой единые блоки. Однако, это характерно не для всех насадок. Так, например, в работе [50] описана конструкция уголковой насадки. Она представляет собой блоки из уголкового профиля, устанавливаемых в колонный аппарат в шахматном порядке, причем оси симметрии уголков параллельны вектору гравитации. При этом на данной насадке в качестве поверхности тепломассообмена попеременно выступает то плёнка жидкости, то капли жидкости вместе со струями жидкости, стекающие с вышележащих элементов насадки на нижележащие. В работе [51] описана конструкция двутавровой насадки. Она выполняется из двутаврового профиля, устанавливаемого в насадочный аппарат под углом 45° . Принципиальное отличие двутавровой насадки от многих других типов насадок заключается в том, что она работает в эмульсионном режиме. При этом газ барботирует через слой насадки, образуя множество пузырей, поверхность которых и является поверхностью тепломассообмена. В работе предложена конструкция регулярной насадки с эффектом эжектирования. Насадка представляет собой пакеты гофрированных листов, установленных вертикально, вершинами гофр друг к другу. При этом образуется система зигзагообразных каналов для газа, в то время как жидкость перетекает с выступа гофр одного листа во впадину гофр соседнего листа с образованием плоской струи. Таким образом, для данной насадки процессы массообмена происходят между потоком газа, и пространственными струями жидкости. В Ивановском государственном химико-технологическом университете была разработана пакетная вихревая насадка [52], работающая в устойчивом эмульсионном режиме при скоростях газа (пара) от 2,5 до 5,5 м/с. При этом, по мнению авторов [53-55], при движении газа через слой данной насадки, имеет место закручивание газожидкостной смеси. Это приводит к определенной интенсификации тепломассообмена, а также к сепарации капель. Следует отметить также необычную конструкцию цепной насадки, описанной в работах [56,57]. Данная насадка представляет собой подвешенные в колонном аппарате цепи, по которым стекает плёнка жидкости. Движущийся противотоком газ взаимодействует с гравитационно стекающей по цепям плёнкой жидкости.

Общим присущим недостатком стационарных нерегулярных и регулярных насадок является то, что они подвержены зарастанию твердыми отложениями. Кроме того, стационарные нерегулярные насадки обладают значительным гидравлическим сопротивлением.

1.2 Конструкции теплообменных аппаратов с регулярной подвижной насадкой

Аппаратам с регулярной подвижной насадкой (РПН) предшествовали конструкции аппаратов с подвижной насадкой (ПН), к числу которых относятся аппараты со взвешенной, фонтанирующей насадкой и с циркулирующей насадкой [19, с.28], различающиеся характером движения насадочных элементов.

В аппаратах со взвешенной насадкой (ВН) 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 [19, с.31; 58]. Наряду с общеизвестными и наиболее изученными аппаратами ВН имеются их конструктивные разновидности, в которых с помощью приемов продольно-поперечного секционирования улучшается однородность взвешивания и структура газожидкостного слоя.

Исследователи аппаратов ПН уделяют большое внимание конструкциям тарелок в виде усеченного конуса или аппаратам конусообразной формы [19, с.33; 59]. 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 неперфорированных перифериях тарелки слой насадки по наклонной поверхности конуса скатывается вниз. Насадка совершает в центре аппарата восходящее фонтанирующее движение, а у стенок – нисходящее [19, с.33; 58, с.10].

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 [19, с.34; 58, с.10].

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.

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 [19, с.44].

Форма насадки должна обеспечивать равномерность взвешивания и наибольший диапазон устойчивой работы. В качестве насадок ВН, ФН и ЦН наиболее предпочтительны сферические тела [19, с.44].

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 [58, с.22]. 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 [19, с.44].

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 [19, с.38].

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.

В этих аппаратах используется принцип продольно-поперечного секционирования, реализуемый регулярным размещением насадочных элементов. При этом удастся полнее использовать энергию газового потока для создания вихревой структуры с малым гидравлическим сопротивлением. Равномерное и регулярное расположение подвижных насадок в аппаратах РПН является необходимым условием достижения однородности структуры газожидкостного потока в объеме рабочей зоны. 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 [19, с.38].

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 [19, с.56].

В работе [19, с.56] приведена классификация аппаратов с РПН по создаваемой в них вихревой структуре. Классификация охватывает основные формы воздействия на характер движения газожидкостных потоков: вихревое движение, создаваемое при обтекании насадочных тел, регулярно размещенных в объеме контактной зоны; вихревое движение, осложненное вибрацией пластинчатых и пластинчатых спиральных элементов; вихревое движение, осложненное вращением насадочных элементов и локальной закруткой потока в зоне формирования вихрей.

Классическая вихревая структура реализуется в аппаратах с регулярной подвижной насадкой, содержащей насадочные элементы простых геометрических форм – шары, пластины, призматические тела с круглым, квадратным, х-образным поперечным сечением [60,61]. Аппараты, реализующие вихревую структуру потоков, осложненную вибрацией пластинчатых элементов со свободными и утяжеленными концами изучены в работах [62], с пластинчатыми пружинными (спиральными) элементами [63].

Применительно к аппаратам с регулярной вращающейся насадкой созданы конструкции аппаратов с вертикальным и горизонтальным расположением пластинчатой насадки [24], с насадкой в виде пластин, разрезанных на сектора и повернутых под углом относительно плоскости [64], вращающейся пластинчатой насадкой и неподвижными сетчатыми перегородками для ограничения полета капель [65], с вращающейся насадкой с пластинчатыми лопастями на спицах [66], с вращающейся насадкой с горизонтально расположенными насадочными элементами.

Аппараты, реализующие вихревую структуру потоков, осложненную вращением пластинчатых элементов исследованы в работах [61, с.40; 67], а локальная закрутка потоков в зоне формирования вихрей в работе [68].

1.3 Методы расчета гидродинамических характеристик и параметров массообмена в аппаратах с регулярной подвижной насадкой

Вначале рассмотрим условия проведения, полученные результаты исследований и расчетные уравнения для аппаратов с регулярной подвижной насадкой с элементами классической формы, а затем отметим особенности расчета аппаратов с вращающейся пластинчатой насадкой [69].

Исследования аппаратов с колеблющейся насадкой в случае применения струн со свободно насаженными шарами [70,71] показали, что в этих аппаратах достигаются высокие нагрузки по газу (линейная скорость газа до 7,0 м/с) и жидкости (плотность орошения до 100 м³/м²ч), при этом гидравлическое сопротивление составляет 500-1000 Па на 1,0 м высоты газожидкостного слоя.

По результатам исследований выявлено три гидродинамических режима: капельный режим, режим развитой турбулентности и режим захлебывания. Режим развитой турбулентности является оптимальным для аппарата с колеблющейся насадкой, который характеризуется газожидкостным слоем, состоящим из газожидкостных вихрей.

В работах [72] 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 650 кг/м³. Струны изготовлены из гибкой проволоки и размещены по вершинам равностороннего треугольника на расстоянии друг от друга 100 мм. Расстояние между элементами насадки на струне по вертикали 120 мм, 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:

$$\Delta P = \xi_{c.p.} \frac{\rho_z W_z^2}{2S_0^2} + 2\xi_{cm} \left(\frac{W_z}{\varphi} \right)^2 \frac{H_0}{D_a} + \Delta P_{c.n.} + \left[\varepsilon_0 - \varphi - 4 \left(\frac{d_n}{D_a} \right)^2 n_3 \frac{h_{nl}}{H_0} \right] \rho_{жс} \cdot g H_0, \quad (1.1)$$

в которой

$$\Delta P_{c.n.} = 2\xi_n \frac{\rho_z W_z^2 (1 - \varepsilon_0)}{d_n \varepsilon_n^2}. \quad (1.2)$$

Количество удерживаемой жидкости рассчитывается по формуле:

$$F_z = 0,019 \left(\frac{W_z}{W_{жс}} \right)^{0,17} S_0^{0,25} \quad (1.3)$$

Для расчета высоты газожидкостного слоя дано выражение:

$$H_0 = \frac{h_0}{\varepsilon_0} \left[1 + \frac{K(1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0} \right] F_z + 2 \sqrt{\frac{K}{\varepsilon_0} F_z}, \quad (1.4)$$

а для расчета газосодержания:

$$\varphi = \frac{2}{\sqrt{\frac{1}{K\varepsilon_0 F_2} \left[1 + \frac{2K(1-\varepsilon_0)}{\varepsilon_0} F_2 + 2\sqrt{\frac{K}{\varepsilon_0} F_2} \right] + 1 + 1}}. \quad (1.5)$$

Коэффициент продольного перемешивания жидкой фазы вычисляется по формуле:

$$E_{ж} = K_{пр} \frac{(\varepsilon_0 - \varphi)^{2/3}}{\varphi} \left(\frac{\rho_z}{\rho_{жс}} \right)^{1/3} \left(\frac{d_n}{t_g t_r^2} \right)^{1/3} \left(\frac{H_\delta D_a}{H_\delta + D_a} \right)^{1/3} H_\delta W_z. \quad (1.6)$$

Для аппаратов с регулярной подвижной пластинчатой насадкой [73] проведены исследования гидродинамических закономерностей и получены расчетные зависимости гидравлического сопротивления:

$$\Delta P = \Delta P_c (1 + f), \quad (1.7)$$

где:

$$\Delta P_c = \xi \theta_g \frac{\rho_z W_z^2}{2\varepsilon_0^2} \cdot \frac{H}{t_g}, \quad (1.8)$$

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

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

$$\theta_g = \frac{2\varepsilon \cdot t_g}{4\varepsilon^2 - 2\varepsilon \cdot t_g + t_g}. \quad (1.9)$$

Для эжекционного и форсуночного варианта аппарата РПН [74] получены уравнения для расчета гидравлического сопротивления:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_{жс}, \quad (1.10)$$

для эжекционного варианта

$$\Delta P_c = \left(\xi_n + \frac{\xi_n}{\varepsilon_n^2 \cdot \Gamma^2} \cdot \frac{H_n}{t_g} \right) \cdot \frac{\rho_z W_{zn}^2}{2}, \quad (1.11)$$

для форсуночного варианта

$$\Delta P_c = \left(\xi_p \frac{1}{S_0^2} + \frac{S_n}{\varepsilon_n^2} \cdot \frac{H_n}{t_g} \right) \cdot \frac{\rho_z W_z^2}{2}, \quad (1.12)$$

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

Для коэффициента сопротивления насадки дано выражение:

$$\xi_n = 0,26 \cdot \theta_g \cdot \theta_z \cdot \exp\left(0,121 \frac{t_g}{\varepsilon}\right), \quad (1.13)$$

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

Сопротивление газожидкостного слоя для эжекционного аппарата уравнение (1.10) определяется по формуле:

$$\Delta P_{жс} = \lambda \frac{\rho_z W_{zn}^2}{2} + \rho_{жс} g [(1 - \varphi_s) \cdot \Delta h + h_{nl}]. \quad (1.14)$$

В работах [60,61,75,76] для аппаратов с регулярной подвижной насадкой различной геометрической формы принят единый подход для определения гидравлического сопротивления:

$$\Delta P = \xi \frac{H}{t_g} \cdot \frac{\rho_z W_z^2}{2\varepsilon_0^2}, \quad (1.15)$$

где $\xi_L = K \cdot \theta_{gL} \cdot \theta_{pL} (t_g / \varepsilon)^{0,65} \exp(-0,177 \cdot t_g / \varepsilon)$ - коэффициент сопротивления для пластинчатой насадки при больших плотностях орошения;

$\xi_L = 0,1 \cdot \theta_g \cdot \theta_p \cdot \text{Re}_{жс}^{0,2}$ - коэффициент сопротивления для пластинчатой насадки при плотностях орошения до $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ [75,76];

$\xi_L = 0,677 \theta_g \theta_p \text{Re}_{жс}^{0,1}$ - коэффициент сопротивления для шаровой насадки [60, с.43].

Во всех аппаратах с регулярной подвижной насадкой [61, с.100; 77] для расчета количества удерживаемой жидкости 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:

$$h_0 = (h_{nl} + h_k) \cdot \frac{H}{t_g}. \quad (1.16)$$

Для плоских пластин [73, с.156] пленочная составляющая КУЖ рассчитывается по формуле:

$$h_{пл} = \delta_{пл} v^2 / t_z^2, \quad (1.17)$$

где $\delta_{пл}$ – толщина пленки жидкости на поверхности пластин:

$$\delta_{пл} = 0,5 \left(\frac{v \cdot U_{жс}}{\mu \sqrt{g}} \right)^{2/3} \left(\frac{\cos \alpha}{1 + \cos \alpha} \right)^{2/3}, \quad (1.18)$$

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

$$h_k = B_h \cdot \frac{\xi_L}{g \rho_{жс}} \cdot \frac{\rho_z W_z^2}{2} \cdot \frac{(2 - \varepsilon_0)(1 - \varepsilon_0^2)}{\varepsilon_0^2}, \quad (1.19)$$

Для пластинчатой вибрирующей, а также для пластинчатой насадки при больших нагрузках по жидкости [76, с.112] получены аналогичные выражения.

В работе [75, с.84], исходя из аналогии:

$$h_0 = \frac{\Delta P - \Delta P_c}{g \rho_{жс}}, \quad (1.20)$$

получено выражение:

$$h_0 = \frac{\xi_L - \xi_c}{g \rho_{жс}} \cdot \frac{\rho_z W_z^2}{2 \varepsilon_0^2} \cdot \frac{H}{t_g}, \quad (1.21)$$

где ξ_L и ξ_c коэффициенты сопротивления орошаемого и сухого аппарата, соответственно; опытный коэффициент для аппарата с трубчатой насадкой $V=0,65$; для аппарата с пластинчатой насадкой $V=0,52$; для аппарата с шаровой насадкой $V=0,545$ [60, с.46].

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

$$\varphi = \varepsilon \left(1 - \frac{h_0}{H} \right), \quad (1.22)$$

Для определения коэффициента массоотдачи в газовой фазе для пластинчатой насадки, исходя из диссипативного подхода получено уравнение [73, с.156]:

$$\beta_{zs} = 1,6B^{1/4} \left(\frac{h_k W_z}{t_g^2 \cdot d_k} \right)^{1/4} \cdot \frac{H}{1 - \frac{h_k}{t_g}} \cdot \frac{D_z^{1/2}}{v_z^{1/4}}, \quad (1.23)$$

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

Средний диаметр капель определялся по уравнению:

$$d_k = B_d \frac{\sigma^{0,9} v_{ж}^{0,3} \varepsilon_0^{0,6}}{\theta_g^{0,4} \rho_{ж}^{0,2} \rho_z^{0,7} v_z^{0,2} g \theta^{0,3} U_{ж}^{0,3} U_z} \cdot \left(\frac{1 + \cos \alpha}{\cos \alpha} \right)^{0,3}. \quad (1.24)$$

Для аппарата с регулярной подвижной пластинчатой насадкой при больших плотностях орошения получено уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в газовой фазе [76, с.112] в следующем виде:

$$\beta_{zs} = 5,44 \cdot C_k^{1/4} \left(\frac{\varphi}{1 - \varphi} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{h_k}{t_g - h_k} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{H}{t_g} \right)^{1/4} \cdot \frac{U_z^{3/4} D_z^{1/2}}{d_k^{1/4} v_z^{1/4}}, \quad (1.25)$$

где диаметр капель:

$$d_k = B_k \frac{1}{\xi_L^{0,26}} \cdot \frac{\delta_{nl}^{0,6} \rho_{ж}^{0,14} \sigma^{0,4}}{U_z^{0,8} \rho_L^{0,54}}. \quad (1.26)$$

Для аппарата с пластинчатой насадкой при плотностях орошения до $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ [75, с.85] получено уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в газовой фазе в следующем виде:

$$\beta_{zs} = 73 \frac{\xi_L}{(1 - \varepsilon) \varepsilon_0^{4/5} \Phi^{3/5}} \cdot \frac{W_z^{4/5} \rho_z^{2/5} v_z^{4/3}}{d_k^{3/5} \sigma^{2/3} D_z^{1/3}}, \quad (1.27)$$

где диаметр капель

$$d_k = 26,8 \left(\frac{\pi \cdot \sigma^{9/5} \rho_{nl}^{6/5} \varepsilon_0^{18/5}}{\xi_L^{6/5} \rho_{ж}^{19/5} \rho_z^{8/15} W_z^{18/5}} \right)^{1/3}. \quad (1.28)$$

При использовании единого диссипативного подхода автором [60, с.62] получено уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в газовой фазе:

$$\beta_{zs} = B_{\beta_{zs}} \cdot \left[\frac{D_z^2 \cdot C_k \cdot U_z^3 \cdot (h_0 - h_{nl})}{\varphi_{яч} (t_b - h_{nl}) \cdot d_k \cdot v_z} \right]^{1/4}, \quad (1.29)$$

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 [76, с.113] уравнение:

$$\beta_{жс} = 8,2 \xi_L^{1/4} (1 - \varepsilon_L)^{1/4} \left(\frac{\rho_z}{\rho_{жс}} \right)^{1/4} \left(\frac{H}{t_g} \right)^{1/4} \cdot \frac{U_z^{3/4} D_{жс}^{1/2}}{(h_k + h_{пл})^{1/4} \nu_{жс}^{1/4}}, \quad (1.30)$$

Автором [72, с.24] получено уравнение для определения коэффициента массоотдачи в жидкой фазе:

$$\beta_{жс} = K_k \frac{\rho_z^{0,6} \cdot U^{1,2} D_M^{0,5}}{\nu_{жс}^{0,12} \rho_{жс}^{0,2} \cdot \sigma^{0,3} d_H^{0,08}} + K_{пл} \frac{U_{жс}^{2/3} g^{0,08} D_M^{0,5}}{\nu_{жс}^{0,5} d_H^{0,08}}, \quad (1.31)$$

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

$$Sh_z = A Re_z^{6/8} Sc_z^{-3/4}, \quad (1.32)$$

Для аппаратов с регулярной вибрирующей пластинчатой насадкой [61, с.151] получены уравнения для определения коэффициента массоотдачи в газовой и жидкой фазах в следующем виде:

$$Sh_z^* = A_z \cdot Re_z^{*3/4} \cdot Sc_z^{1/2}, \quad (1.33)$$

$$Sh_{жс}^* = A_{жс} \cdot Re_{жс}^{*3/4} \cdot Sc_{жс}^{1/2} \cdot K_\rho^{1/4}, \quad (1.34)$$

где $A_{\bar{a}} = B_\Gamma \left[\frac{\xi_L (1 - \varepsilon) t_g}{\delta_n \cdot \varphi_y} \right]^{1/4}$ - безразмерный параметр, характеризующий

взаимодействие вихрей в орошаемом слое регулярной подвижной насадки, при определении коэффициента массоотдачи в газовой фазе; $A_{жс} = B_{жс} \left[\frac{\xi_L (1 - \varepsilon_0) \cdot t_g}{h_k} \right]^{1/4}$

- безразмерный параметр, характеризующий взаимодействие вихрей в газожидкостном слое при определении коэффициента массоотдачи в жидкой фазе.

В работе [19, с.140] приведена методика расчета аппаратов с регулярной вращающейся пластинчатой насадкой круглой (РПВКр) и квадратной (РПВКв) формы.

Гидравлическое сопротивление сухого аппарата рассчитывают по формуле:

$$\Delta P_c = \xi_c \cdot \frac{H}{t_b} \cdot \frac{\rho_r W_r^2}{2\varepsilon_0^2}, \quad (1.35)$$

где ξ_c – коэффициент сопротивления сухой насадки; H – высота насадочной зоны, м; t_b – расстояние между элементами насадки в вертикальном направлении, м; ρ_r – плотность газа, кг/м³; W_r – скорость газового потока, м/с; ε_0 – порозность насадки, м²/м².

В уравнении (1.35) коэффициент сопротивления сухой насадки имеет вид:

$$\xi_c = K_1 \cdot \theta_b \cdot \theta_p + \left(\frac{Re_{ц}}{Re_r} \right)^{0,5}, \quad (1.36)$$

где коэффициент K_1 для аппарата РПВКр $K_1=0,76$, для РПВКв $K_1=0,74$; $Re_{ц}$ – модифицированное число Рейнольдса, рассчитываемый по уравнению:

$$Re_{ц} = \frac{n_s \cdot b^2}{v_r}. \quad (1.37)$$

Здесь b – характерный размер насадочного элемента, м; n_s – число оборотов насадочных элементов, с⁻¹, определяемое по следующей зависимости:

$$n_s = \frac{\omega_{вр}}{2\pi}, \quad (1.38)$$

где $\omega_{вр}$ – частота вращения насадочных элементов (с⁻¹), рассчитываемое по формуле

$$\omega_{вр} = B_{вр} \cdot \sqrt{\frac{(\rho_r \cdot W_r^2 - \rho_{ж} W_{ж}^2) \cdot S \cdot \sin \alpha \cdot K}{2mR + \rho_r R^2 \cdot S \cdot \sin \alpha \cdot tg \alpha}}, \quad (1.39)$$

в которой $B_{вр}$ – коэффициент: для аппарата РПВКр $B_{вр}=30/\varepsilon$; для аппарата РПВКв $B_{вр}=21,2/\varepsilon$.

В работе [78] проведена оценка составляющих уравнения (1.39) и в результате получено следующее упрощенное выражение:

$$\omega_{вр} \approx \sqrt{\frac{\rho_r \cdot W_r^2 S \varepsilon \cdot \sin \alpha}{2mR}}, \quad (1.40)$$

в котором:

для РПВКр $S_3 = \frac{\pi b^2}{4}$ и $R = \frac{b}{2}$;

для РПВКв $S_3 = \sigma^2$ и $R = \frac{\sigma\sqrt{2}}{2}$.

Число Рейнольдса Re_Γ вычисляем по формуле:

$$Re_\Gamma = \frac{W_\Gamma \cdot d_{экв}}{\nu_\Gamma}, \quad (1.41)$$

в которой эквивалентный диаметр насадки рассчитывают по следующим зависимостям:

для аппарата РПВКр:

$$d_{экв.} = \frac{4t_b \cdot t_p^2 - \pi b^2 \delta}{\pi b(0,5b + \delta)}, \quad (1.42)$$

для аппарата РПВКв:

$$d_{экв.} = \frac{4t_b \cdot t_p^2 - b^2 \delta}{2b(b + \delta)}, \quad (1.43)$$

где δ – толщина пластины, м.

Входящий в уравнение (1.36) коэффициент θ_b имеет вид:

$$\theta_b = 0,85 + 0,15 \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{4 \cdot t_b}{m_k \cdot b} + 1 \right) \right], \quad (1.44)$$

где параметр m_k для симметрично образующихся вихрей:

$$m_k = 2,2(1 - e^{-t_b/b}). \quad (1.45)$$

Коэффициент θ_p рассчитывают по формуле:

$$\theta_p = \varepsilon_{kp} / \varepsilon_0, \quad (1.46)$$

в которой порозность насадки определяют по уравнению:

$$\varepsilon_0 = 1 - K_0 \cdot \left(\frac{b}{t_p} \right)^2, \quad (1.47)$$

где коэффициент K_0 для аппарата РПВКр $K_0 = 0,785$; для РПВКв $K_0 = 1$.

Гидравлическое сопротивление орошаемого аппарата рассчитывают по формуле (1.15), в которой коэффициент сопротивления орошаемой насадки имеет вид:

$$\xi_L = K_2 \cdot \theta_b \cdot \theta_p \cdot \text{Re}_n^n \left(\frac{\text{Re}_j}{\text{Re}_r} \right)^m, \quad (1.48)$$

где коэффициент K_2 , n и m для аппарата РПВКр $K_2= 0,1$; $n=0,53$; $m=0,5$; для РПВКв $K_2= 0,104$; $n = 0,51$; $m=0,5$.

Количество жидкости, удерживаемой в аппарате h_0 рассчитывают по формуле (1.16). Входящие в формулу составляющие $h_{пл}$ и h_k по уравнению (1.17) и (1.19). Толщину пленок жидкости на насадочных элементах рассчитывают по следующей зависимости:

$$\delta_{пл} = \left(\frac{3 \cdot v_j \cdot U_j}{2 \cdot \omega_{вп}^2 \cdot \sin \alpha} \right)^{1/3}. \quad (1.49)$$

Гаосодержание слоя рассчитывают по формуле (1.22), в которой объемная порозность насадки определяется по уравнениям:

для РПВКр:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi R^2 \delta}{t_b \cdot t_p^2}, \quad (1.50)$$

для РПВКв:

$$\varepsilon = 1 - \frac{b^2 \delta}{t_b \cdot t_p^2} \quad (1.51)$$

В уравнениях (1.50) и (1.51) δ - толщина пластин насадочных элементов, м.

Коэффициент массоотдачи в газовой фазе рассчитывают по уравнению:

$$\beta_{гс} = B_r \left[D_r^2 \cdot \frac{\xi_L (1 - \varepsilon) \cdot U_r^3}{\delta_n \cdot \varphi_{я} \cdot v_r} \right]^{1/4}, \quad (1.52)$$

где D_r – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с; $U_r = W_r / \varphi_{яч}$ – истинная скорость в ячейке, м/с; $\varphi_{яч} = 1 - h_k / t_b$ – газосодержание слоя в ячейке. Опытный коэффициент B_r для аппарата РПВКр $B_r = 6,64 / (1 - \varepsilon)^{1/4}$; для аппарата РПВКв $B_r = 6,4 / (1 - \varepsilon)^{1/4}$.

В критериальном виде расчет производится по уравнению:

$$Sh_r^* = A_r \cdot \text{Re}_r^{*3/4} \cdot Sc_r^{1/2}, \quad (1.53)$$

Здесь $A_r = B_r \cdot H \left[\frac{\xi_L (1 - \varepsilon) \cdot t_g}{\delta_n \cdot \varphi_{я}} \right]^{1/4}$ – безразмерный параметр, характеризующий взаимодействие вихрей в орошаемом слое регулярной подвижной насадки; Sh_r^*

$= \beta_{гс} \cdot t_B / D_{г}$ и $Re_{г}^* = U_{г} \cdot t_B / \nu_{г}$ - модифицированные числа Шервуда и Рейнольдса, отнесенные к высоте ячейки t_B ; $Sc = \nu_{г} / D_{г}$ - число Шмидта.

Обработкой экспериментальных данных коэффициентов массоотдачи в газовой фазе $\beta_{гс}$ исследуемых аппаратов, получены значения опытного коэффициента $B_{г}$ в уравнении (1.52): для аппарата РПВКр $B_{г} = 6,64/(1-\varepsilon)^{1/4}$; для аппарата РПВКв $B_{г} = 6,4/(1-\varepsilon)^{1/4}$.

1.4 Постановка задач исследований

В настоящее время известно большое количество конструкций насадочных элементов, используемых в тепломассообменных насадочных аппаратах для проведения процессов в химической технологии, нефтепереработке, нефтехимии, пищевой промышленности и др. Все многообразие конструкций разделяют на нерегулярные (хаотические) стационарные насадки, регулярные стационарные насадки, подвижные насадки и регулярные подвижные насадки.

Усовершенствование конструкций нерегулярных насадочных элементов происходит в направлении увеличения количества отогнутых элементов, модификации поверхности насадки различными турбулизирующими элементами или путем изменения соотношения высоты и ширины насадочного тела.

Регулярные стационарные насадки имеют совокупность вертикальных каналов, открытых для прохода газа и, при этом, сводится к минимуму количество зон, в которых может происходить задержка жидкости. Для увеличения удельной поверхности регулярных насадок используется гофрированная поверхность, перфорация и всевозможные рифления. Регулярные насадки имеют блочное, пакетное и рулонное исполнение.

Анализ конструкций нерегулярных и регулярных стационарных насадок показал, что для проведения процессов целесообразно использовать чистые газ и жидкость, так как они склонны к зарастанию твердыми отложениями.

Подвижные насадочные элементы различаются характером их движения в контактной зоне аппарата. Конструктивно они могут быть выполнены как аппараты со взвешенной, фонтанирующей насадкой и с циркулирующей насадкой. Благодаря хаотичным, прямолинейным и пульсационным движениям обеспечивается достаточно высокая эффективность проведения процессов, однако энергетические затраты на подъем насадочных элементов и поддержание их во взвешенном состоянии довольно значительные.

Регулярная подвижная насадка, в которой насадочные элементы регулярно с фиксированным шагом распределены в рабочей зоне аппарата позволяет значительно снизить энергозатраты и при этом для интенсификации проводимых процессов в полной мере использовать закономерности вихревого взаимодействия потоков газа и жидкости. Кроме того, определенное конструктивное исполнение насадочных элементов позволяет дополнительно к вихревому взаимодействию обеспечить вибрационное или вращательное движение, что несомненно способствует росту эффективности.

В настоящее время известны результаты исследований аппаратов с регулярной подвижной вращающейся пластинчатой насадкой круглой и квадратной формы (РПВКр и РПВКв) [61, с.43; 79]. При работе таких аппаратов выявлено, что ввиду малой площади контакта пластинчатой насадки со струной, возникающая при вращении сила трения способствует быстрому износу струны и ее разрушению. Кроме того, разбрызгиваемая со свободных лопастей жидкость в большом количестве отбрасывается на стенки аппарата и не участвует в проводимых процессах.

Нами предложено установить кольцевые ободы непосредственно на свободных концах прямоугольных лопастей. Результаты исследований такой конструкции насадки в настоящее время отсутствуют.

В связи с вышеизложенным, для проведения комплексных исследований аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом и разработки научно обоснованной методики расчета необходимо выполнение следующих задач:

- изучение закономерностей взаимодействия газовой и жидкой фаз в контактной зоне регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом и получение расчетных зависимостей структурных составляющих жидкой фазы;

- экспериментальное исследование параметров движения насадочных элементов (частоты вращения), гидродинамических характеристик (гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости, газосодержания слоя) регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом при изменении режимных и конструктивных параметров и получение расчетных зависимостей;

- экспериментальное исследование массообменных характеристик (коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах) при изменении режимных параметров и получение расчетных зависимостей;

- разработка научно-обоснованной инженерной методики расчета разработанного аппарата и рекомендаций по проектированию и эксплуатации;

- внедрение технической документации в промышленности.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИК ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Технологическая схема экспериментальной установки

На рисунке 2.1 представлена экспериментальная установка для проведения исследований параметров движения, гидродинамических и тепломассообменных характеристик аппарата с регулярной вращающейся насадкой в лабораторных условиях. Экспериментальная установка включала модель аппарата квадратного поперечного сечения (340x340 мм) 1, закрепленную на крышке сборной емкости 10, вентилятор 2, калорифер 4, насос 8, напорную емкость 7 для подачи орошающей жидкости в контактную зону аппарата через ороситель 5, промежуточную емкость 9. Регулирование скорости газового потока осуществлялось шибером 3, а количество подаваемой жидкости вентилем 6.

Поток воздуха, нагнетаемый вентилятором 2, поступает через калорифер 4 и сборную емкость 10 в колонный аппарат 1 сечением 340x340 мм и высотой рабочей зоны 1,3 м. Затем, проходя через слой вращающейся насадки, орошаемый жидкостью, поступающей через ороситель 5, выбрасывается в атмосферу. Расход воздушного потока регулируется шибером 3 по показаниям стандартной диафрагмы с дифманометром. Орошающая жидкость из нижней емкости аппарата 10 через промежуточную емкость 9 насосом 8 подается в напорный бак 7, откуда через ороситель 5 поступает на орошение. Расход воды регулируется вентилем 6 по показаниям ротаметра.

В технологической схеме предусмотрен нагрев газового потока в калорифере 4, а поступающей на орошение жидкости в напорной емкости 7.

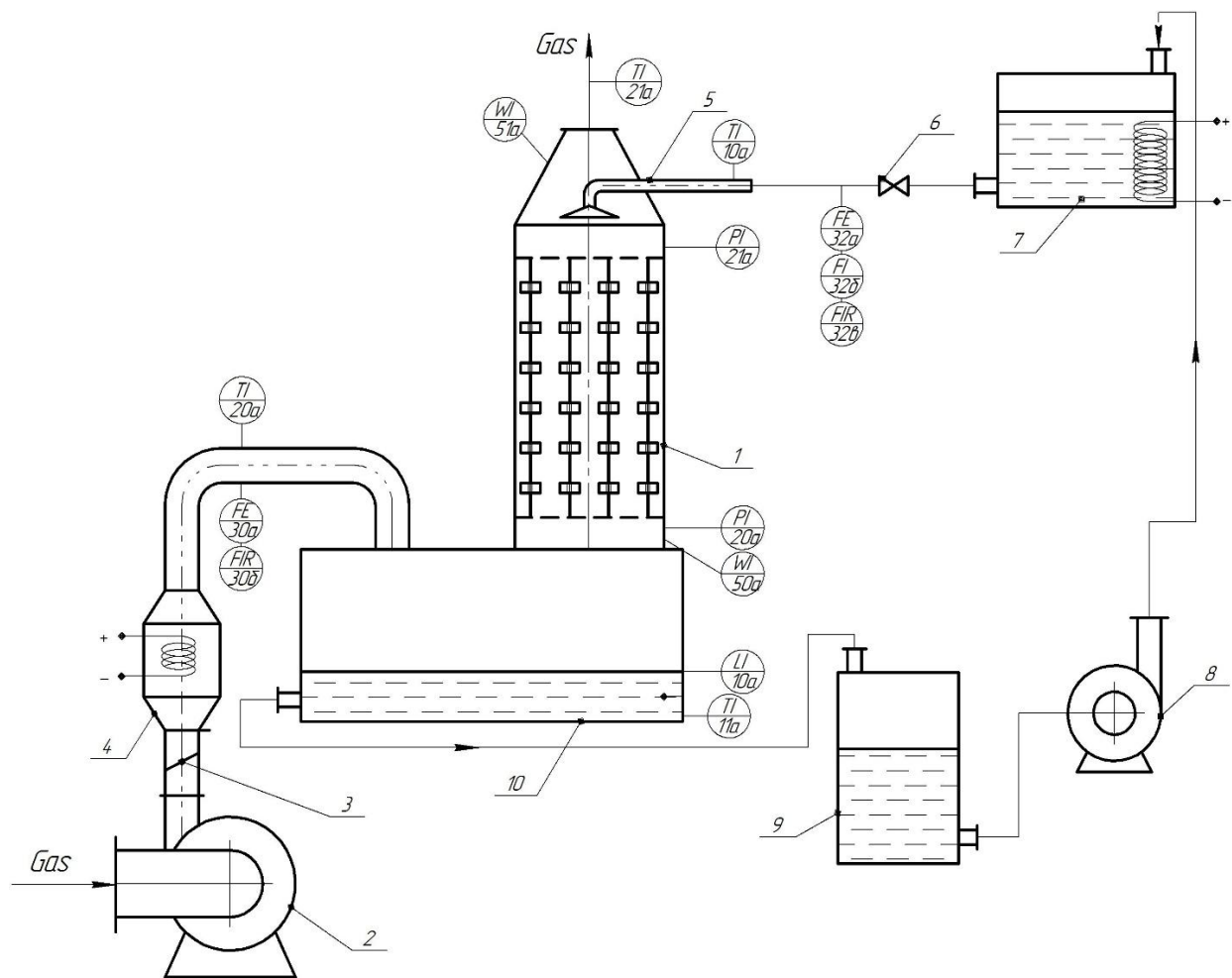
Диапазон изменения:

режимных параметров:

- скорость газа w_r - 1÷5 м/с;
- плотность орошения L - 10÷75 м³/м²·ч;
- температура воздуха $t_{\text{возд}}$ = 20÷120 °С.

конструктивных параметров:

- шаг между насадочными элементами по вертикали $t_v/d_{об}$ – 3,5;
- шаг между насадочными элементами по горизонтали $t_p/d_{об}$ - 2;
- размер насадочных элементов: $d_{об} = 0,05$ м.



1 - аппарат с вращающейся насадкой; 2 – вентилятор; 3 – шибер; 4 – калорифер; 5 – ороситель; 6 – вентиль; 7 - напорная емкость для подачи орошающей жидкости; 8 – насос; 9 - промежуточная емкость; 10 - сборная емкость.

Рисунок 2.1 - Технологическая схема установки для исследования параметров движения, гидродинамических и тепломассообменных характеристик аппарата с регулярной вращающейся насадкой

2.2 Методики для проведения экспериментальных исследований

2.2.1 Методика исследования параметров движения насадочных элементов

Исследование качественных и количественных параметров движения исследуемых насадок проведено на установке (рисунок 2.1), дополнительно укомплектованной стробоскопическим тахометром [61, с.37].

Метод стробоскопических исследований относится к бесконтактным, т.е. позволяет проводить измерения без воздействия на исследуемые объекты и нарушения структуры газожидкостного слоя. В рабочей зоне аппарата, элементы насадки, закрепленные на струнах, совершали вращательные движения под действием потоков газа и жидкости. Наблюдения за движением и необходимые замеры осуществлялись при помощи осветителя и тахометра.

Тахометр стробоскопической 2ТСт32-456 представляет собой переносной прибор с осветителем, создающим кратковременные вспышки с определенной длительностью и частотой.

Наблюдая при помощи тахометра вращающиеся или вибрирующие элементы насадки, можно благодаря стробоскопическому эффекту рассматривать их в состоянии кажущейся неподвижности или замедленного движения. Такие наблюдения позволяют определить скорость движения изучаемого объекта, а также получить ценные сведения об особенностях его движения и работы.

Основная погрешность тахометра при питании прибора от сети переменного тока напряжением 220В при температуре окружающего воздуха $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ не превышает $\pm 0,5\%$ от верхнего предела измерения соответствующего поддиапазона шкалы.

2.2.2 Методики исследования гидродинамических характеристик

Гидравлическое сопротивление измерялось чашечным манометром и проверялось наклонным микроманометром.

Исследование *количества удерживаемой насадкой жидкости* проводилось методом «отсечки» при одновременном закрытии шиберов на газовом тракте и вентиля на линии подачи воды и с последующим измерением объема стекающей жидкости мерной емкостью [3, с.333].

Газосодержание определялось расчетным путем, как отношение объема жидкости удерживаемой насадкой в контактной зоне аппарата к объему контактной зоны.

2.2.3 Методики исследований коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах

Для проведения исследований *коэффициентов массоотдачи в газовой фазе* установка была укомплектована ртутными термометрами и психрометрами Ассмана с ценой деления $0,1^{\circ}\text{C}$.

Для определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе, отнесенных к сечению аппарата $\beta_{\text{гс}}$ или к его объему $\beta_{\text{гв}}$, использовали широко применяемую методику, основанную на изучении процесса адиабатического испарения воды в воздух [79].

Согласно данной методики значения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе $\beta_{\text{гс}}$ и $\beta_{\text{гв}}$ рассчитывали по следующим формулам:

$$\beta_{\text{гс}} = \frac{W_{\text{г}} \cdot \gamma_{\text{г}} \cdot \Delta x \cdot R \cdot T_k \cdot P_0}{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta P_{\text{ср}}} \quad (2.1)$$

и

$$\beta_{\text{гв}} = \frac{\beta_{\text{гс}}}{H} \quad (2.2)$$

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

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

В уравнениях (2.1)÷(2.3): γ_r – 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 [80,81], а также рассчитывали [82] по уравнениям:

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

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

Исследование *коэффициента массоотдачи в жидкой фазе* проведено для моделирования процесса абсорбции средне- и плохо растворимых газов по нижеописанной методике.

Для этого случая приготовление насыщенного кислородом раствора осуществлялось следующим образом: насосом через эжектор осуществлялась циркуляция воды из бака 9 (рисунок 2.1). С помощью эжектора производилось насыщение воды кислородом, поступающим из баллона. Непрерывная циркуляция жидкости способствовала равномерному насыщению всего объема воды. Процесс насыщения длился 30-40 мин до достижения концентрации кислорода в воде 30-35 мг/л, что в три раза превышает концентрацию, равновесную с воздухом.

Содержание кислорода в воде до и после аппарата определяли по методу Винклера [83] и с помощью кислородомера марки КЛ-115.

Расчет коэффициента массопередачи в жидкой фазе, приравненного к коэффициенту массоотдачи (для случая, когда сопротивление массопереносу сосредоточено в жидкой фазе), проводился по методике, приведенной в работах [84-89].

Массовая концентрация кислорода в воздухе определялась по уравнению:

$$\bar{y} = \frac{g}{100} \cdot \frac{\gamma_{O_2}}{\gamma_{возд}}, \quad (2.6)$$

где ϑ – объемная концентрация кислорода в воздухе в % по газоанализатору;
 γ_{O_2} и $\gamma_{\text{возд.}}$ – удельные веса кислорода и воздуха, Н/м³.

Равновесная концентрация кислорода рассчитывалась по закону Генри:

$$p = E \cdot x^* \quad (2.7)$$

Здесь x^* – равновесная мольная концентрация компонента, Кмоль/ Кмоль; p – парциальное давление компонента над раствором, Па; E – константа Генри, Па.

Данные по константе Генри для кислорода взяты из работы [3, с.24]. Парциальное давление кислорода в растворе определялось по уравнению:

$$P_{O_2} = \frac{\bar{y} \cdot M_{\text{возд.}}}{M_{O_2}} \cdot p, \quad (2.8)$$

где $P = B + \Delta P_{an}$ – полное давление газовой смеси в аппарате, Па; B – барометрическое давление, Па; ΔP_{an} – перепад давления в аппарате, Па.

Равновесная массовая концентрация кислорода определялась по формулам:

$$\bar{x}_{\text{вх}}^* = \frac{P_{O_2}^{\text{вх}} \cdot M_{O_2}}{E \cdot M_{H_2O}} \cdot \rho_{H_2O}, \quad (2.9)$$

$$\bar{x}_{\text{вых}}^* = \frac{P_{O_2}^{\text{вых}} \cdot M_{O_2}}{E \cdot M_{H_2O}} \cdot \rho_{H_2O}. \quad (2.10)$$

Средняя движущая сила процесса рассчитывалась как среднелогарифмическая по известному уравнению:

$$\Delta \bar{x}_{cp} = \frac{(\bar{x}_{\text{вх}} - \bar{x}_{\text{вх}}^*) - (\bar{x}_{\text{вых}} - \bar{x}_{\text{вых}}^*)}{\ln \frac{(\bar{x}_{\text{вх}} - \bar{x}_{\text{вх}}^*)}{(\bar{x}_{\text{вых}} - \bar{x}_{\text{вых}}^*)}}. \quad (2.11)$$

Число единиц переноса определяли по формуле:

$$N_x = \frac{\bar{x}_{\text{вх}} - \bar{x}_{\text{вых}}}{\Delta \bar{x}_{cp}}. \quad (2.12)$$

Коэффициент массопередачи K_{Ox} , приравненный к коэффициенту массоотдачи в жидкой фазе и отнесенный к площади сечения аппарата $\beta_{жс}$ рассчитан по уравнению:

$$K_{OX} = \beta_{жс} = \frac{Q_{ж}(\bar{x}_{ВХ} - \bar{x}_{ВЫХ})}{F \cdot \Delta\bar{x}_{cp}} = \frac{Q_{ж} \cdot N_x}{F}. \quad (2.13)$$

Коэффициент массоотдачи, отнесенный к объему рабочей зоны аппарата, определим по уравнению:

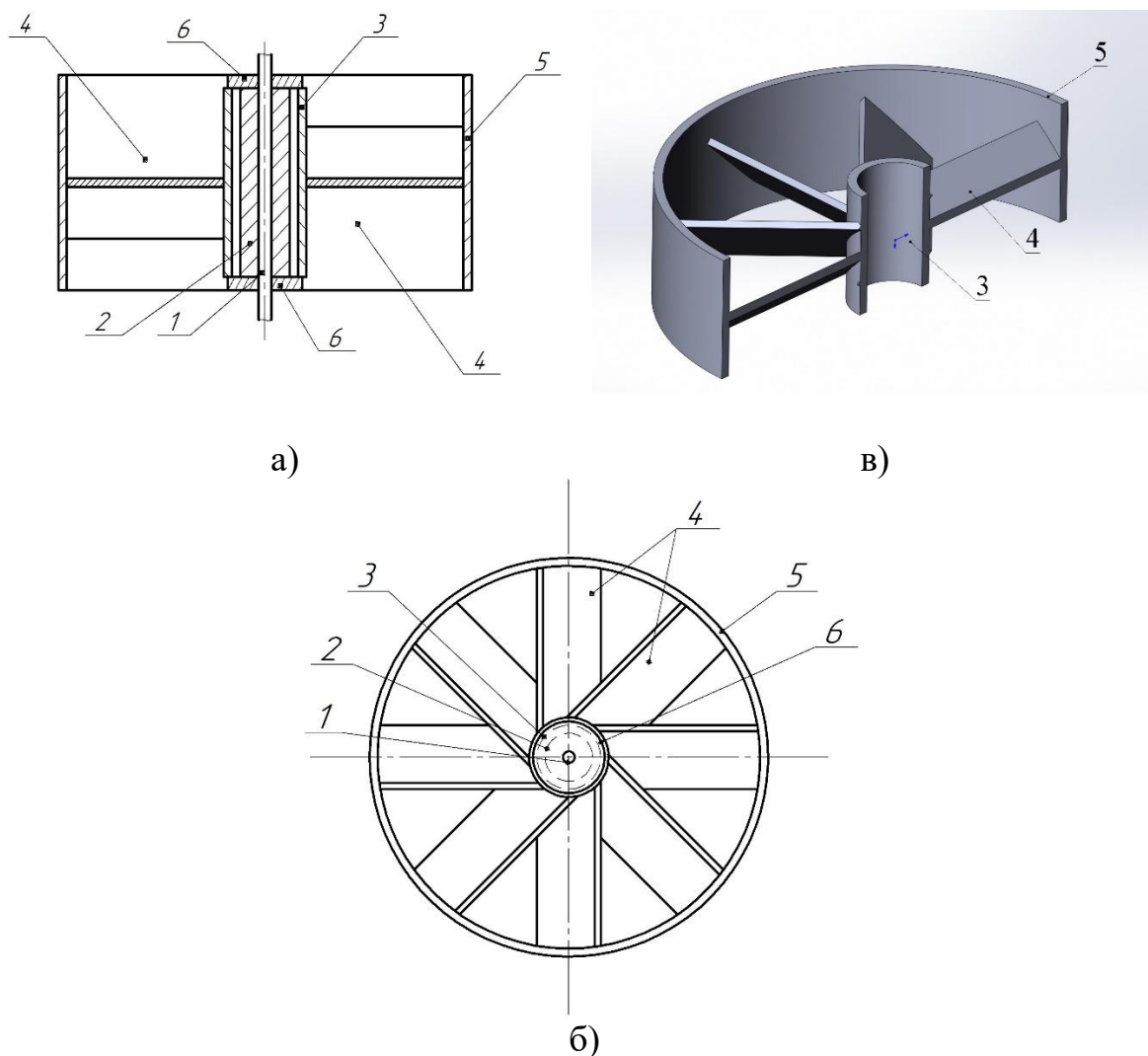
$$\beta_{жв} = \frac{Q_{ж} \cdot N_x}{V_{p.z.}}. \quad (2.14)$$

В уравнениях (2.20) и (2.21) $Q_{ж}$ – расход жидкости, м³/ч; F – площадь сечения аппарата, м²; $V_{p.z.}$ – объем рабочей зоны, м³.

3 ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ НАСАДКИ В АППАРАТЕ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ НАСАДОЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

3.1 Конструкция вращающейся насадки с прямоугольными лопастями и расчет конструктивных параметров насадки

Для проведения исследований была изготовлена вращающаяся насадка с прямоугольными лопастями (ВПЛ) (рисунок 3.1).



а) – общий вид насадочного элемента; б) – вид сверху; в) – разрез насадочного элемента в аксонометрии. 1 - ось; 2 - втулка; 3 – трубчатый элемент; 4 - наклонные прямоугольные лопасти; 5 - кольцевой обод; 6 - ограничители.

Рисунок 3.1- Вращающаяся насадка ВПЛ

Насадка включает ось 1, на которой закреплена втулка 2. Вокруг втулки вращается трубчатый элемент 3. Для устранения перемещения втулки в вертикальном направлении служат ограничители 6. Наклонные прямоугольные

лопасти 4 одним концом прикреплены к поверхности трубчатого элемента, а другим к внутренней поверхности кольцевого обода 5.

При работе динамический напор газа воздействует на наклонные лопасти, приводя во вращательное движение насадочный элемент. Поступающая в верхней части насадочного элемента жидкость отбрасывается к внутренней поверхности обода, который ограничивает ее перемещение в радиальном направлении и способствует организации факела распыла в вертикальном направлении.

Для расчета конструктивных параметров насадки рассмотрим движение газового потока в контактной зоне аппарата. 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 [3, с.328].

Для насадочных аппаратов со стационарной насадкой [3, 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:

$$S_{\text{кан}} = \frac{S \cdot H \cdot \varepsilon}{H \cdot k} = \frac{S \cdot \varepsilon}{k} \quad (3.1)$$

Величину $\omega = S_{\text{кан}}/S = \varepsilon/k$, равную отношению среднего сечения каналов к сечению колонны, называют живым сечением насадки [3 с.328].

Средняя скорость газа:

$$w = \frac{V_z}{S_{\text{кан}}} = \frac{V_z}{S \cdot \omega} = \frac{w_0 \cdot k}{\varepsilon}, \quad (3.2)$$

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

Обычно принимают $k=1$, тогда $\omega = \varepsilon$ и уравнение (3.2) принимает вид:

$$w = \frac{w_0}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

Эквивалентный диаметр насадки определим как эквивалентный диаметр каналов, по которым движется газ [3, с.328]:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4\varepsilon}{a_n}, \quad (3.4)$$

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

Для аппарата с регулярной вращающейся насадкой нами получены уравнения для определения порозности в сечении аппарата, объемной порозности и эквивалентного диаметра насадки [90].

Порозность вращающейся насадки в сечении аппарата.

На рисунке 1 представлена ячейка насадки в сечении аппарата размером $t_p \times t_p$.

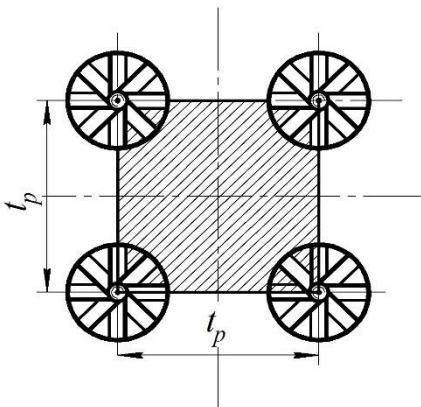


Рисунок 3.2 - Ячейка насадки в сечении аппарата

В общем виде порозность вращающейся насадки в сечении аппарата может быть определена по формуле:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{S_{\text{эл}}}{S_{\text{яч}}}, \quad (3.5)$$

где $S_{\text{эл}}$ - площадь составляющих насадочного элемента, м^2 ; $S_{\text{яч}}$ - площадь ячейки насадки, м^2 .

Площадь составляющих элементов вращающегося насадочного элемента определим по формуле:

$$S_{\text{эл}} = S_{\text{тр}} + S_{\text{лоп}} + S_{\text{об}}. \quad (3.6)$$

Здесь
площадь трубы (с учетом диска)

$$S_{\text{тр}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{тр}}^2}{4} \quad (3.7)$$

площадь лопастей

$$S_{\text{лоп}} = 8 \cdot b \cdot \cos \alpha \cdot l \quad (3.8)$$

площадь обода

$$S_{об} = \pi \cdot d_{об} \cdot \delta_{об} \quad (3.9)$$

В уравнениях (3.7) – (3.9) $d_{тр}$ – диаметр трубы, м; b и l – ширина и длина лопасти, м; α – угол наклона лопасти; $d_{об}$ – диаметр обода, м; δ – толщина обода, м.

Площадь ячейки насадки:

$$S_{яч} = t_p^2, \quad (3.10)$$

где t_p – радиальный шаг между осями с вращающимися элементами.

После подстановки всех величин в формулу (3.5) имеем:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{0,785 \cdot d_{тр}^2 + 8 \cdot b \cdot \cos \alpha \cdot l + \pi \cdot d_{об} \cdot \delta}{t_p^2} \quad (3.11)$$

На рисунке 3.3 представлена ячейка насадки в объеме аппарата размером $t_p \times t_p \times t_b$.

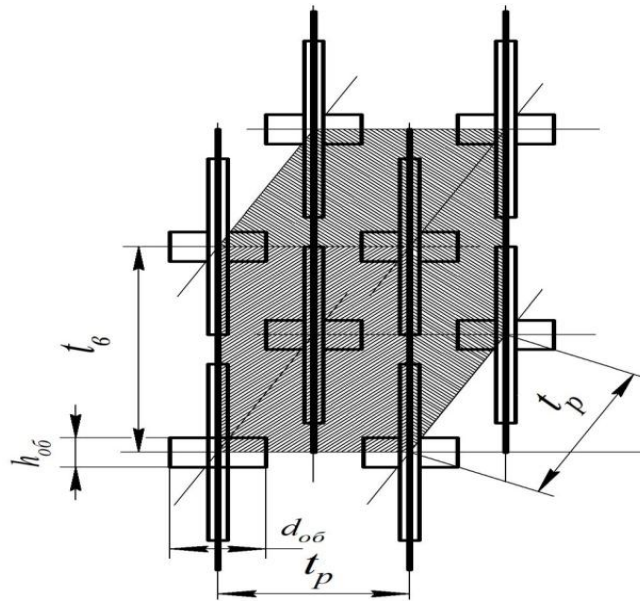


Рисунок 3.3 - Ячейка насадки в объеме аппарата

Объемная порозность регулярной вращающейся насадки может быть определена по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{эл}}{V_{яч}} \quad (3.12)$$

Объем составляющих элементов вращающегося насадочного элемента определим по формуле:

$$V_{эл} = V_{тр} + V_{лоп} + V_{об}. \quad (3.13)$$

Здесь
объем трубы (с учетом диска)

$$V_{тр} = \frac{\pi \cdot d_{тр}^2}{4} \cdot t_B \quad (3.14)$$

объем лопастей

$$V_{лоп} = 8 \cdot b \cdot \cos \alpha \cdot l \cdot \delta_{лоп} \quad (3.15)$$

объем обода

$$V_{об} = \pi \cdot d_{об} \cdot \delta_{об} \cdot h_{об} \quad (3.16)$$

Объем ячейки насадки:

$$V_{яч} = t_p^2 \cdot t_B, \quad (3.17)$$

где t_B – вертикальный шаг между вращающимися элементами.

Подставляя формулы (3.14) – (3.16) в уравнение (3.5), а затем в (3.12), получим:

$$\varepsilon = 1 - \frac{0,785 \cdot d_{тр}^2 \cdot t_B + 8 \cdot \cos \alpha \cdot l \cdot \delta_{лоп} + 3,14 \cdot d_{об} \cdot h_{об} \cdot \delta_{об}}{t_{тр}^2 \cdot t_B} \quad (3.18)$$

Эквивалентный диаметр регулярной вращающейся насадки определяется по формуле (3.4).

Удельную поверхность вращающейся насадки определим по формуле:

$$a_H = \frac{S_{эл}^H}{V_{яч}} \quad (3.19)$$

Удельная площадь составляющих элементов вращающегося насадочного элемента определим по формуле:

$$S_{эл}^H = S_{тр}^H + S_{лоп}^H + S_{об}^H \quad (3.20)$$

Здесь
удельная площадь трубы

$$S_{\text{ТР}}^{\text{H}} = \pi \cdot d_{\text{ТР}} \cdot t_{\text{В}} \quad (3.21)$$

удельная площадь лопастей

$$S_{\text{ЛОП}}^{\text{H}} = 16 \cdot b \cdot l \quad (3.22)$$

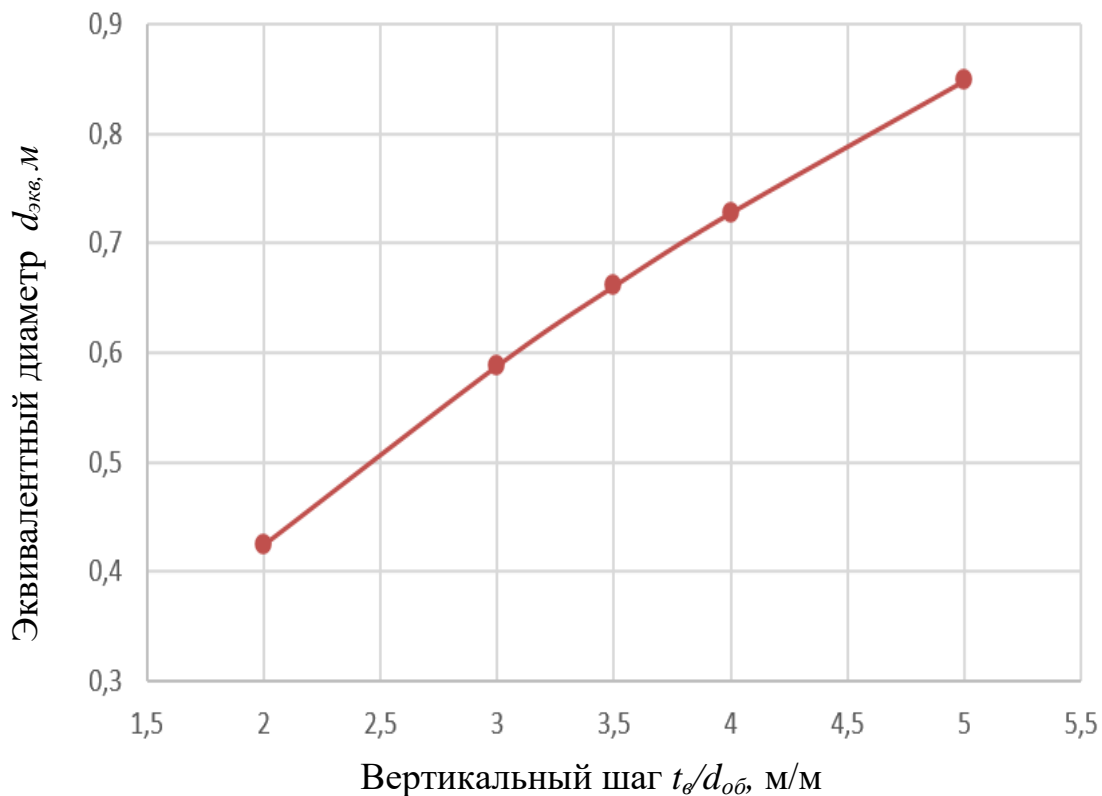
удельная площадь обода

$$S_{\text{ОБ}}^{\text{H}} = 2 \cdot \pi \cdot d_{\text{ОБ}} \cdot h_{\text{ОБ}} \quad (3.23)$$

Подставляя формулы (3.18) и (3.19), с учетом (3.21) – (3.23), в уравнение (3.4), получим:

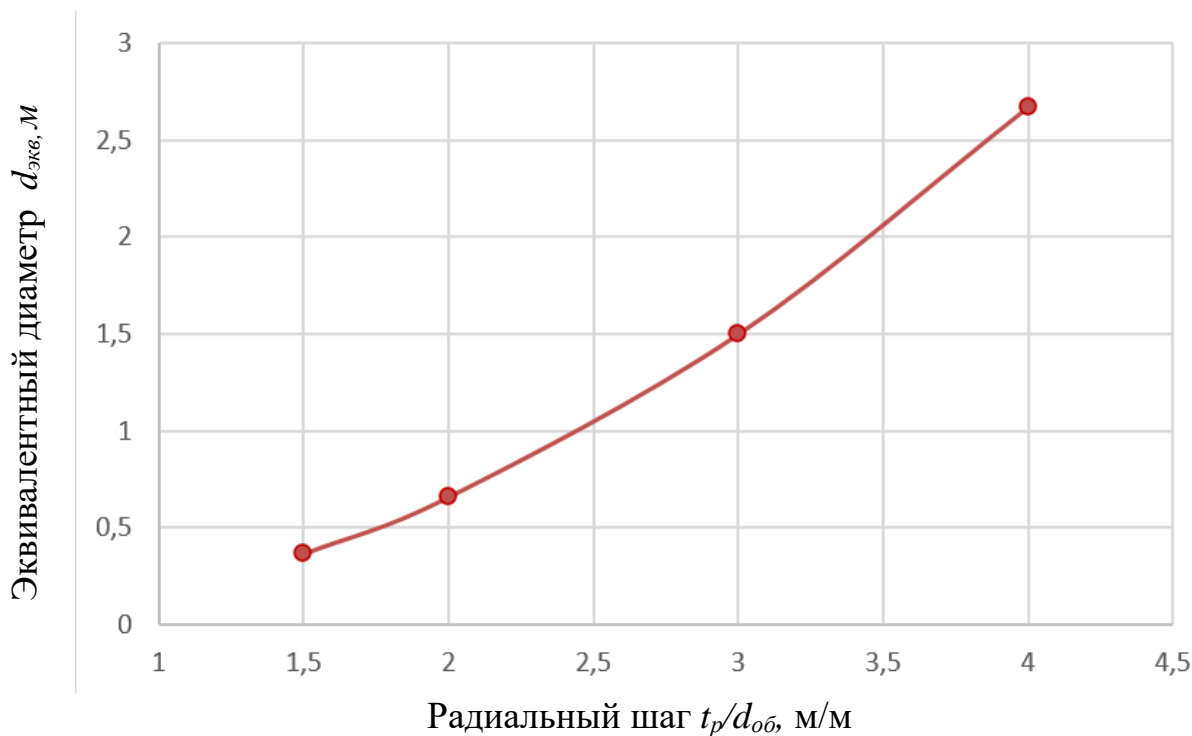
$$d_{\text{ЭКВ}} = \frac{4 \cdot [t_{\text{ТР}}^2 \cdot t_{\text{В}} - (0,785 \cdot d_{\text{ТР}}^2 \cdot t_{\text{В}} + 8 \cdot \cos \alpha \cdot l \cdot \delta_{\text{ЛОП}} + 3,14 \cdot d_{\text{ОБ}} \cdot h_{\text{ОБ}} \cdot \delta_{\text{ОБ}})]}{3,14 \cdot d_{\text{ТР}} \cdot t_{\text{В}} + 16 \cdot b \cdot l + 6,28 \cdot d_{\text{ОБ}} \cdot h_{\text{ОБ}}} \quad (3.24)$$

На рисунках 3.4 и 3.5 приведены результаты расчета по полученным уравнениям.



Условия опытов: $t_{\text{р}}=2d_{\text{об}}$; $d_{\text{об}} = 50$ мм.

Рисунок 3.4 - Зависимость эквивалентного диаметра регулярной вращающейся насадки $d_{\text{экв}}$ от шагов расположения элементов насадки в вертикальном направлении $t_{\phi}/d_{\text{об}}$



Условия опытов: $t_b = 3,5d_{об}$; $d_{об} = 50$ мм

Рисунок 3.5 - Зависимость эквивалентного диаметра регулярной вращающейся насадки $d_{экв}$ от шагов расположения элементов насадки в радиальном направлении $t_p/d_{об}$

Как видно из рисунка 3.4 при изменении шагов расположения труб в вертикальном направлении $t_b/d_{об}$ от 2 до 5, также как и при изменении шагов расположения труб в радиальном направлении $t_p/d_{об}$ от 1,5 до 2 (рисунок 3.5) значение величин $d_{экв}$ растут. Это очевидно, так как зависимость эквивалентного диаметра от шагов расположения труб прямо пропорциональна.

Графические зависимости эквивалентного диаметра регулярной вращающейся насадки от шагов расположения элементов насадки в вертикальном и радиальном направлениях (рисунки 3.4 и 3.5) не позволяют определить их оптимальные значения. Такие данные могут быть получены при анализе результатов исследований энергетических затрат на проведение процессов и достигаемой эффективности с изменением конструктивных параметров насадки, которые представлены ниже.

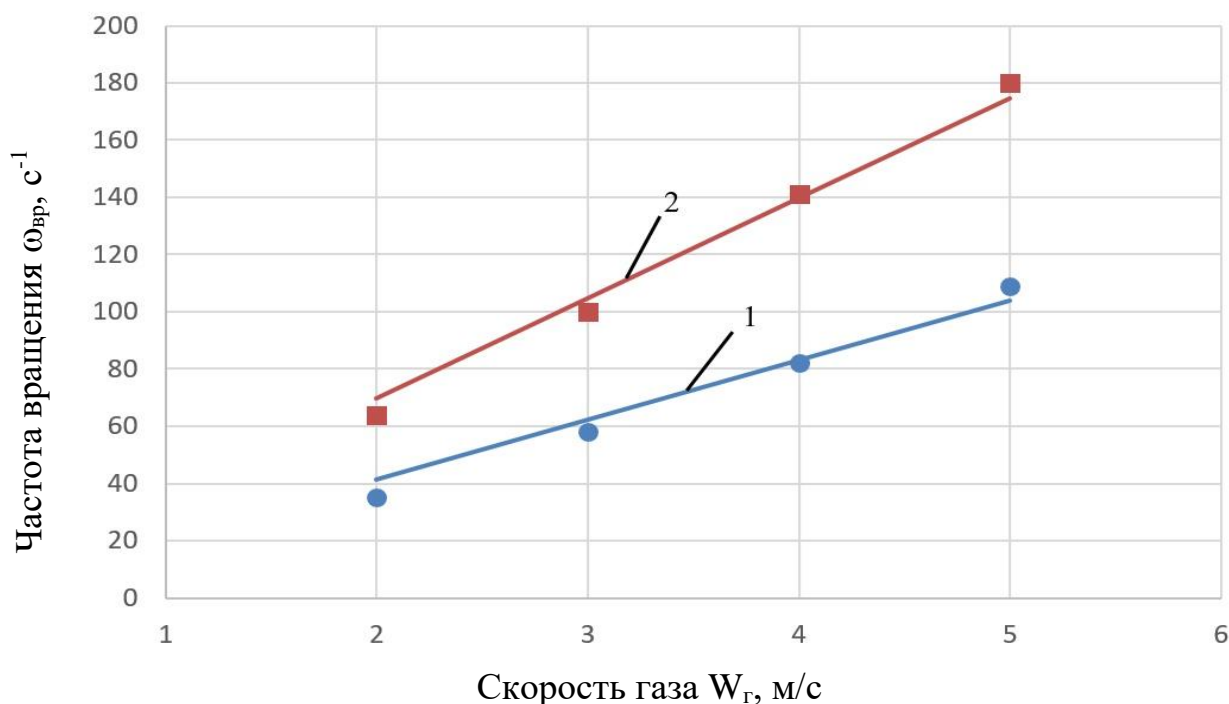
3.2 Частота вращения насадочных элементов и их расчет

В работах [61, с.42], [67, с.50] и [91] приведены данные исследований гидродинамики и массообмена аппарата с регулярной вращающейся пластинчатой насадкой круглой формы (РПКр), представляющей собой круглые пластины, разрезанные на 8 треугольных секторов относительно центра

вращения. Каждый сектор был повернут на угол 45° относительно плоскости пластины.

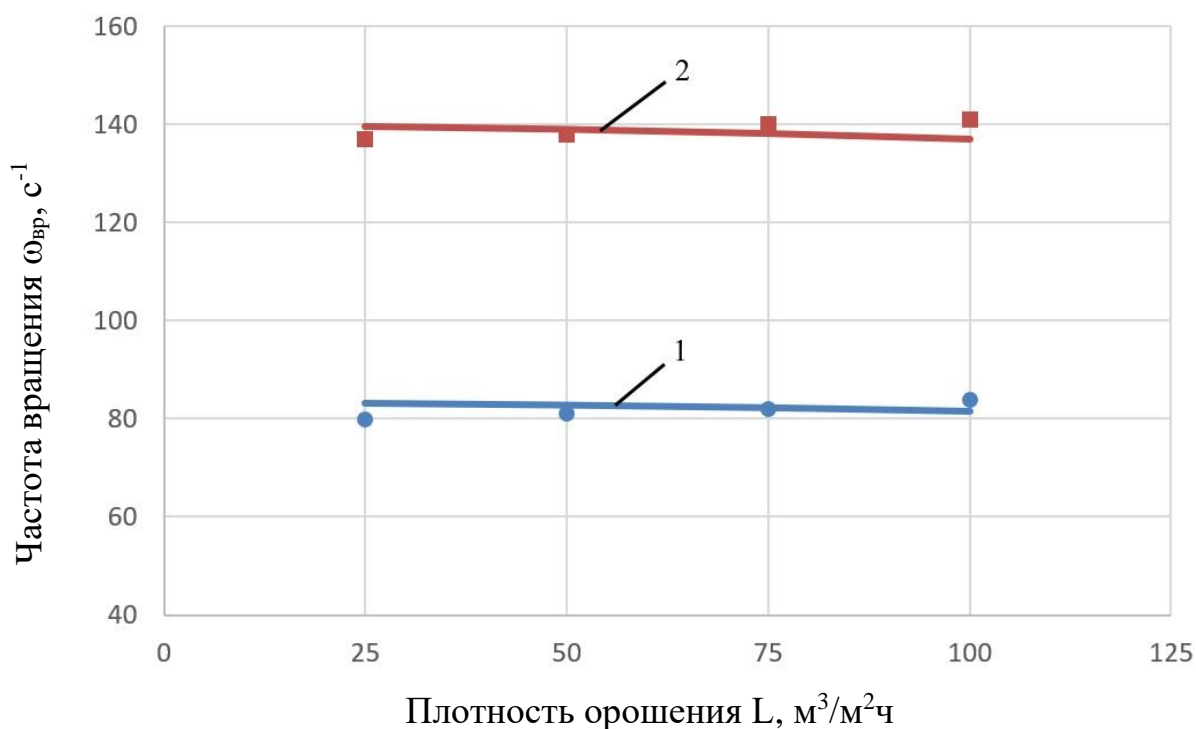
При работе аппаратов РПВКр выявлено, что ввиду малой площади контакта пластинчатой насадки со струной, возникающая при вращении сила трения способствует быстрому износу струны и ее разрушению. Кроме того, разбрызгиваемая со свободных лопастей жидкость в большом количестве отбрасывается на стенки аппарата и не участвует в проводимых процессах. Попытка ограничить перемещение капель жидкости в радиальном направлении с помощью неподвижных сетчатых перегородок привела к усложнению конструкции насадки и увеличению ее материалоемкости. Нами предложено установить кольцевые ободы непосредственно на свободных концах прямоугольных лопастей.

На рисунках 3.6 и 3.7 представлены результаты исследований частоты вращения насадок ВПЛ и РПВКр в зависимости от скорости газа и плотности орошения [92].



Условия опытов: вращающаяся насадка ВПЛ: $t_b = 3,5d_{об}$; $t_p = 2d_{об}$; $d_{об} = 50$ мм; вращающаяся насадка РПВКр: $t_b = 3,5d$; $t_p = 2d$; $d = 80$ мм; $L = 25$ м³/м²ч. Кривые — расчет; точки — эксперимент. 1 и 2 — $\omega_{вр}$ насадок ВПЛ и РПВКр.

Рисунок 3.6 - Зависимость частоты вращения $\omega_{вр}$ вращающихся насадок ВПЛ и РПВКр от скорости газа W_r



Условия опытов: см. рисунок 3.6. $W_r=4$ м/с. Кривые – расчет; точки – эксперимент. 1 и 2 - $\omega_{вр}$ насадок ВПЛ и РПВКр.

Рисунок 3.7 - Зависимость частоты вращения $\omega_{вр}$ вращающихся насадок ВПЛ и РПВКр от плотности орошения L

С увеличением скорости газового потока частота вращения насадок ВПЛ и РПВКр растут (рисунок 3.6). Это связано с тем, что при увеличении скорости газового потока растет динамический напор газа, воздействующий на лопасти вращающихся насадок. Экспериментальные данные частоты вращения для насадки РПВКр значительно выше, чем насадки ВПЛ. Это связано с тем, что площадь соприкосновения трубчатого элемента с втулкой в насадке ВПЛ больше, чем площадь соприкосновения пластинчатой насадки и струны в РПВКр. При большей площади соприкосновения, возникающая сила трения, приводящая к торможению вращения у насадки ВПЛ выше.

Увеличение количества подаваемой жидкости (рисунок 3.7) приводит к снижению частоты вращения вращающихся насадок. Объяснением этому является то, что при неизменной скорости газа, а, следовательно величины динамического напора, рост количества находящейся на насадочных элементах жидкости утяжеляет их, приводя к снижению исследуемых параметров.

В результате обработки экспериментальных данных получены следующие расчетные зависимости.

Баланс сил при воздействии на лопасти вращающегося насадочного элемента имеет вид [93]:

$$\frac{F_{ц.б.}}{tg\alpha} = F_{дг} - F_{дж} - F_{сопр} \quad (3.25)$$

Или

$$m\omega^2 R = \left(\frac{\rho_{г} \cdot W_{г}^2}{2} \cdot S_{л} \cdot \sin \alpha - \frac{\rho_{ж} \cdot W_{ж}^2}{2} \cdot S_{л} \cdot \sin \alpha - \frac{\rho_{г} \cdot \omega_{вр}^2 \cdot R^2}{2} \cdot S_{л} \cdot \sin \alpha \right) \cdot tg\alpha \quad (3.26)$$

Здесь: $F_{цб}$ – центробежная сила, Н; $F_{дг}$ – сила динамического напора газового потока, Н; $F_{дж}$ – сила динамического напора жидкостного потока, Н; $F_{сопр}$ – сила сопротивления, Н.

Решая уравнение (3.26) относительно ω , получим:

$$\omega = \sqrt{\frac{(\rho_{г} \cdot W_{г}^2 - \rho_{ж} \cdot W_{ж}^2) \cdot S \cdot \sin \alpha \cdot K}{2mR + \rho_{г} R^2 \cdot S \cdot \sin \alpha \cdot tg\alpha}} \quad (3.27)$$

Уравнение (3.27) справедливо для единичного элемента. В слое вращающейся насадки надо учесть объемную порозность насадки. Таким образом, имеем:

$$\omega_{вр} = \frac{B_{вр}}{\varepsilon} \sqrt{\frac{(\rho_{г} \cdot W_{г}^2 - \rho_{ж} \cdot W_{ж}^2) \cdot S \cdot \sin \alpha \cdot K}{2mR + \rho_{г} R^2 \cdot S \cdot \sin \alpha \cdot tg\alpha}}, \quad (3.28)$$

где $B_{вр}=1,7$ – опытный коэффициент.

Для определения числа оборотов используем известную зависимость:

$$n = \frac{\omega_{вр}}{2 \cdot \pi} \quad (3.29)$$

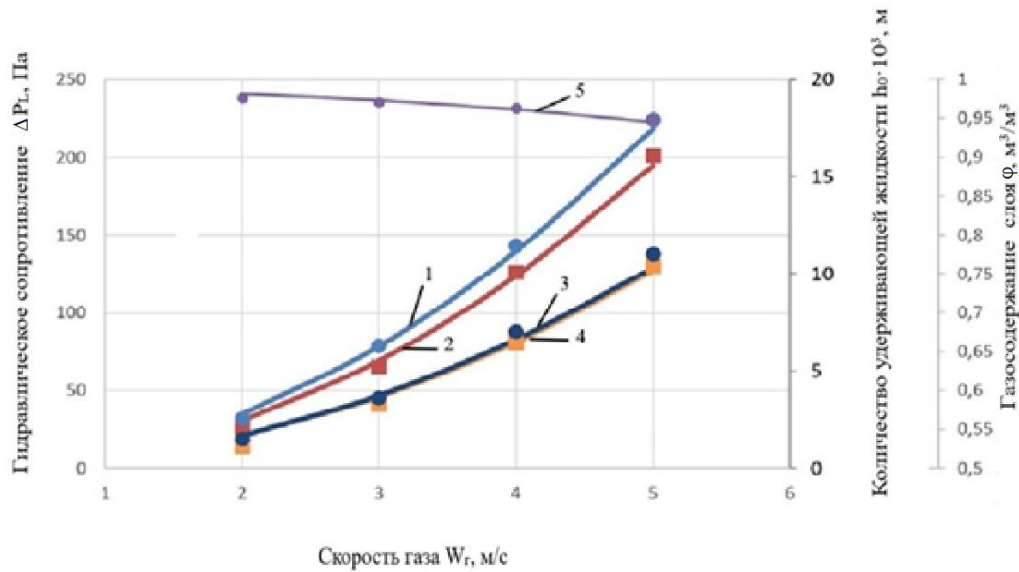
Погрешность определений $\omega_{вр}$ не превышает $\pm 9\%$ в широком диапазоне изменения: $W_{г} = 2-5$ м/с; $L = 15-75$ м³/м²·ч; $t_b = (1 \div 5)d_{об}$; $t_p = (1,5 \div 4)d_{об}$; $\alpha = 45^\circ$.

3.3 Гидродинамические закономерности взаимодействия газовой и жидкой фаз и расчет основных гидродинамических характеристик

Анализ экспериментальных данных гидравлического сопротивления насадочной зоны аппарата ΔP_L в зависимости от скорости газа $W_{г}$ при различных плотностях орошения L , проведенные визуальные наблюдения и фотосъемка показывают, что гидродинамические режимы работы в основном определяются насадочной зоной аппарата, для которой характерны три гидродинамических режима: пленочно-капельный, капельный и брызгоуноса. Аналогичные режимы характерны для большинства аппаратов с регулярной подвижной насадкой [61, с.60].

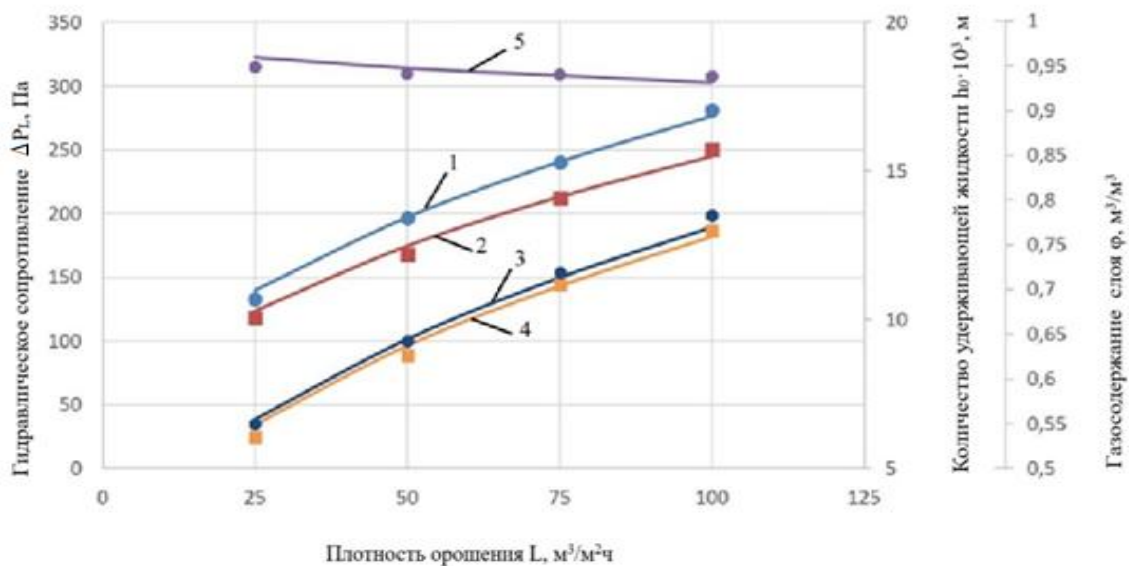
На рисунках 3.8 и 3.9 представлены результаты исследований гидравлического сопротивления, количества удерживающей жидкости и

газосодержания слоя насадок ВПЛ и РПВКр в зависимости от скорости газа и ПЛОТНОСТИ



Условия опытов: см. рисунок 3.6. $L=25 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$. Кривые – расчет; точки – эксперимент. 1 и 2 - ΔP_L , 3 и 4 - h_0 насадок ВПЛ и РПВКр; 5 - ϕ насадки ВПЛ.

Рисунок 3.8 - Зависимость гидравлического сопротивления ΔP_L , количества удерживаемой жидкости h_0 и газосодержания слоя ϕ от скорости газа W_g



Условия опытов: см. рисунок 3.6. $W_g=4 \text{ м/с}$. Кривые – расчет; точки – эксперимент. 1 и 2 - ΔP_L ; 3 и 4 - h_0 насадок ВПЛ и РПВКр; 5 - ϕ насадки ВПЛ.

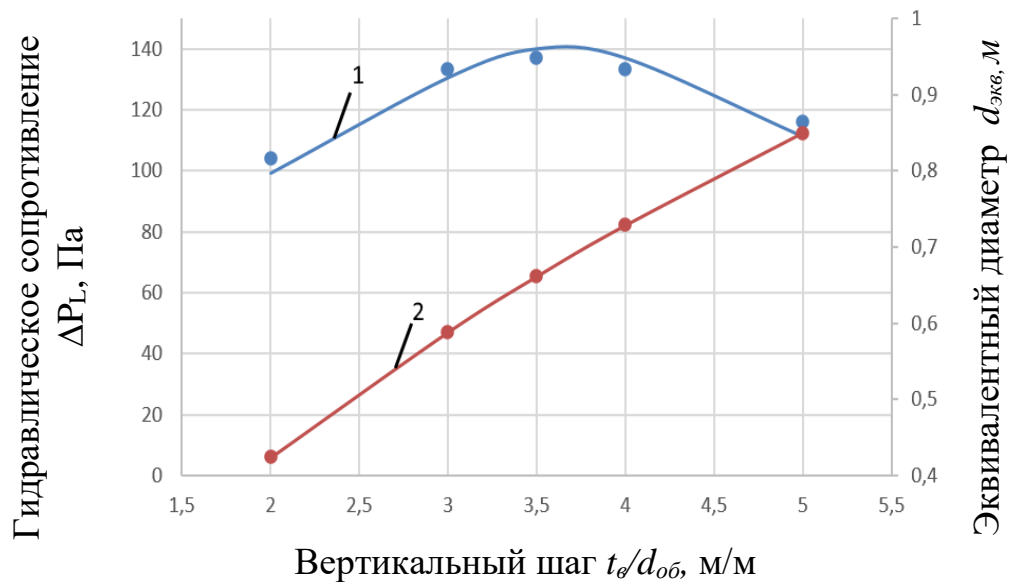
Рисунок 3.9 - Зависимость гидравлического сопротивления ΔP_L , количества удерживаемой жидкости h_0 и газосодержания слоя ϕ от плотности орошения L

Как видно из рисунка 3.8 увеличение скорости газового потока приводит к росту гидравлического сопротивления и количества удерживаемой жидкости. Рост гидродинамических характеристик объясняется увеличением динамического напора, приводящего к удержанию большего количества жидкости в объеме контактной зоны. В результате требуются большие затраты энергии газового потока на прохождение насадочной зоны с вращающейся насадкой. Значения гидравлического сопротивления и количества удерживаемой жидкости для насадки ВПЛ несколько выше, чем для РПВКр. По-видимому, это связано с тем, что в объеме насадочных элементов ВПЛ задерживается большее количество жидкости, тогда как в насадке РПВКр часть жидкости отбрасывается на стенки аппарата и не участвует в процессе дробления. С увеличением скорости газа значения газосодержания снижаются. Это связано с увеличением количества задерживаемой в насадке жидкости при неизменном объеме контактной зоны.

Результаты исследований влияния плотности орошения на гидродинамические характеристики (рисунок 3.9) показывают, что увеличение плотности орошения способствует росту гидравлического сопротивления и количества удерживаемой жидкости, тогда как расчетные значения газосодержания несколько снижаются. Это очевидно, так как растет приток дополнительного объема жидкости и увеличивается время ее задержки, а это способствует увеличению сопротивления и снижению газосодержания.

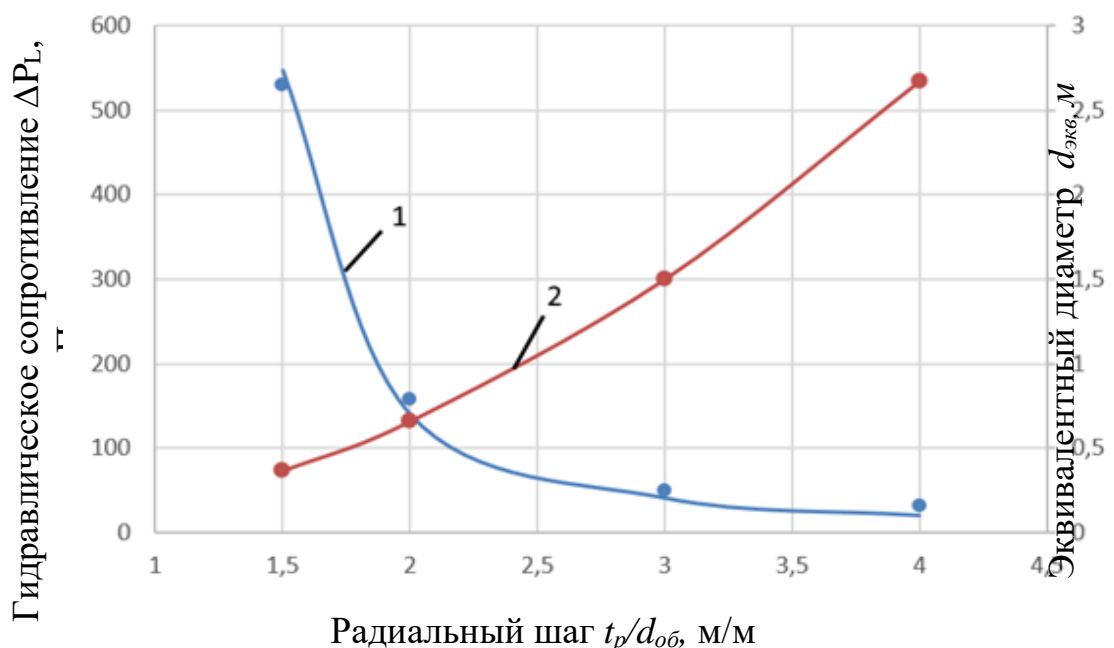
Из рисунка 3.9 также следует, что значения гидравлического сопротивления и количества удерживаемой жидкости для насадки ВПЛ несколько выше, чем для РПВКр. Это связано с лучшими условиями задержки и дробления жидкости в насадке ВПЛ по сравнению РПВКр.

Для анализа энергозатрат нами проведены лабораторные исследования гидравлического сопротивления аппарата с вращающимися насадочными элементами с прямоугольными лопастями с изменением шагов расположения насадочных элементов в вертикальном и радиальном направлениях (рисунки 3.10 и 3.11). Для наглядности на представленных рисунках приведены также результаты вычислительных исследований эквивалентного диаметра вращающейся насадки [94].



Условия опытов: $t_p=2d_{об}$; $d_{об} = 50$ мм; $W_T=4$ м/с; $L=25$ м³/м²ч. Кривые – расчет; точки – эксперимент. 1 - ΔP_L ; 2 - $d_{экв}$.

Рисунок 3.10 - Зависимость гидравлического сопротивления ΔP_L и эквивалентного диаметра $d_{экв}$ насадки ВПЛ от шагов расположения элементов насадки в вертикальном направлении $t_\theta/d_{об}$



Условия опытов: см. рисунок 3.10. $t_B=3,5d_{об}$. 1 - ΔP_L ; 2 - $d_{экв}$.

Рисунок 3.11 - Зависимость гидравлического сопротивления ΔP_L и эквивалентного диаметра $d_{экв}$ насадки ВПЛ от шагов расположения элементов насадки в радиальном направлении $t_p/d_{об}$

Как видно из рисунков 3.10 и 3.11 значения эквивалентного диаметра в диапазонах изменения вертикальных и радиальных шагов расположения вращающихся насадочных элементов растут. Это указывает на то, что при максимальных значениях шагов могут быть достигнуты наименьшие энергозатраты. Однако это не целесообразно. Во-первых, установка насадочных элементов на максимальных расстояниях приведет к значительному увеличению габаритов насадочной зоны, а, следовательно, к росту материалоемкости аппарата и установке более мощного вентилятора для обеспечения оптимальной скорости газового потока, т.е. увеличению энергопотребления. Во-вторых, высокая эффективность проведения процессов в аппаратах с регулярной подвижной насадкой достигается за счет механизма формирования и взаимодействия вихрей при обтекании насадочных элементов установленных с оптимальными шагами расположения в вертикальном и радиальном расположении.

Исследованиям конструктивных параметров в аппаратах с регулярной подвижной насадкой посвящено множество работ. Они свидетельствуют о том, что такие конструктивные параметры, как форма насадочных элементов, расстояния (или безразмерный шаг) между насадочными элементами в вертикальном и радиальном направлениях оказывают большое влияние на гидродинамические и тепломассообменные характеристики аппаратов.

Форма насадочных элементов определяет симметричность вихреобразования. За сферическими (шары) и круглыми насадочными телами (вращающаяся пластинчатая насадка круглой и квадратной формы) образуются симметричные (тороидальные) вихри обладающие периодом движения. За пластинами, призматическими телами с круглым, квадратным, треугольным и т.д. сечением осуществляется несимметричный срыв вихрей, отличием которого является то, что за период движения образуются два вихря, попеременно с противоположных боковых сторон насадочного тела.

Механизмы формирования вихрей и их взаимодействие при обтекании дискретно расположенных по ходу газового потока твердых тел рассмотрены в научном открытии в области механики газа и жидкости. При изменении расстояния между насадочными телами возможно достижение такого момента, когда время образования вихрей и время их движения между соседними насадочными телами совпадает и в результате чего происходит слияние вихрей, сопровождающееся ростом мощности вновь образованных вихрей. Этот режим работы назван синфазным режимом или режимом одновременного вихреобразования. В том случае, если насадочные тела располагаются на расстояниях не обеспечивающих равенство времени образования и времени движения их от одного элемента к другому происходит либо вынужденный срыв не завершивших формирование вихрей (при расстоянии менее оптимального), либо движущиеся вихри от элементов расположенных ниже по потоку достигают насадочные элементы расположенные выше по потоку, когда за ними уже произошел отрыв сформировавшихся вихрей (при расстоянии большим оптимального). В обоих случаях синфазный режим нарушается.

В проведенных нами исследованиях гидравлического сопротивления (рисунок 3.10 кривая 1) оптимальным шагом, обеспечивающим достижение синфазного режима является $t_b = 3,5d_{об}$, в связи с чем на кривой $\Delta P_L = f(t_b)$ имеется экстремум гидравлического сопротивления, так как повышенное потребление энергии в этом режиме связано с одновременным срывом вихрей за цепочкой элементов, обуславливающее максимальное воспроизводство вихрей и вытекающую из этого максимальную потребность энергии.

При нарушении синфазного режима в работе насадочных элементов гидравлическое сопротивление снижается за счет уменьшения числа вихрей, образованных в объеме рабочей зоны. Это происходит, как было отмечено выше, в результате вынужденного срыва вихрей, не завершивших цикл формирования за телами, расположенными выше по потоку, вихрями, оторвавшимися с нижерасположенных по потоку тел. На полученной графической зависимости шаги расположения между насадочными элементами меньше и больше $3,5d_{об}$ приводят к нарушению синфазного режима.

Важность учета образования и взаимодействия вихрей, образованных насадочными элементами, расположенными в радиальном направлении отмечено в работах. В научном открытии дано описание механизма образования и взаимодействия вихрей в одном ряду радиально расположенных элементов. Приведено обоснование критическому расстоянию между насадочными телами, превышение которого приводит к образованию вихрей с частотой, зависящей от размера обтекаемых тел. Расположение насадочных элементов на расстоянии менее критического приводит к тому, что частоту срыва вихрей определяет не размер обтекаемых тел, а величина зазора, образованного соседними в поперечном сечении элементами. Чем меньше зазор, тем больше частота образования и срыва вихрей. Рост числа образованных вихрей при малых величинах зазора приводит к значительному потреблению энергии потока.

На рисунке 3.11 представлена графическая зависимость гидравлического сопротивления от шагов расположения насадочных элементов в радиальном направлении. Как видно из рисунка гидравлическое сопротивление в диапазоне $t_p/d_{об}$ от 1,5 до 2 резко снижается и с дальнейшим увеличением шагов это снижение происходит более плавно.

Критическим значением является шаг расположения насадочных элементов в радиальном направлении равном $t_p/d_{об} = 2$. При меньших значениях частота образованных вихрей зависит от величины зазора, образованного соседними элементами. При малых величинах зазора увеличение числа образованных вихрей приводит к росту гидравлического сопротивления. После критического значения радиального шага происходит перестройка механизма образования вихрей. В этом случае определяющим частоту образования вихрей является размер насадочных элементов и увеличение шагов расположения практически не влияет на частоту образования вихрей. В результате этого гидравлическое сопротивление незначительно снижается.

На основании проведенных исследований нами получена расчетная зависимость для определения гидравлического сопротивления. Энергия,

подводимая газовым потоком в газоочистной аппарат затрачивается на формирование и перемещение вихрей, на трение в паре ось-штулка и трение газа о поверхность пленки жидкости на насадочных элементах, на дробление жидкостного потока на капли, а также на вращение насадочных элементов. Эти затраты могут быть вычислены по следующей зависимости [3, с.337]:

$$\Delta P_L = \xi_L \cdot \frac{H}{d_{\text{ЭКВ}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma} W_{\Gamma}^2}{2\varepsilon_0^2} \quad (3.30)$$

В большинстве работ [95-97] для вычисления гидравлического сопротивления применяется отношение H/t_B . Нам представляется более правомерным использование отношения $H/d_{\text{ЭКВ}}$, так как величина $d_{\text{ЭКВ}}$ учитывает изменение не только вертикального, но и радиального шага.

На основании обработки экспериментальных данных гидравлического сопротивления орошаемого аппарата получено расчетное уравнение для определения коэффициентов сопротивления ξ_L :

$$\xi_L = B_p \cdot \theta_B \cdot \theta_p \cdot \sqrt{\frac{\text{Re}_u \cdot \text{Re}_{\text{жс}}}{\text{Re}_{\Gamma}}} \quad (3.31)$$

где $B_p=0,212$ – опытный коэффициент.

В уравнении (3.31) θ_B – коэффициент, определяющий степень взаимодействия вихрей в вертикальном направлении. Для его вычисления предложена формула [19, с.62]:

$$\theta_B = 0,85 + 0,15 \cdot \text{Sin} \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{4 \cdot t_B}{m_k \cdot d_{\text{об}}} + 1 \right) \right] \quad (3.32)$$

где число Струхалья $Sl=0,15$; m_k – коэффициент, учитывающий снижение скорости движения вихрей в потоке:

$$m_k = 0,54 \cdot (1 - e^{-t_B/d_{\text{об}}}) \quad (3.33)$$

Коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в радиальном направлении θ_p рассчитывается по формуле [19, с.65]:

$$\theta_p = \frac{t_p - \lambda}{t_p - d} \quad (3.34)$$

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: при $t_p > 2d_{\text{об}}$ $\lambda = d_{\text{об}}$; при $t_p < 2d_{\text{об}}$ $\lambda = t_p - d_{\text{об}}$.

Модифицированное число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{ц}} = \frac{n_s \cdot d_{\text{об}}^2}{\nu_{\Gamma}}. \quad (3.35)$$

Здесь n_s - число оборотов насадочных элементов, с^{-1} .

Число Рейнольдса по газовой фазе, которое определяется по формуле:

$$\text{Re}_{\Gamma} = \frac{W_{\Gamma} \cdot d_{\text{экв}}}{\nu_{\Gamma}} \quad (3.36)$$

Число Рейнольдса по жидкой фазе $\text{Re}_{\text{ж}}$ определим по формуле:

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{U_{\text{ж}} \cdot d_{\text{экв}}}{\nu_{\text{ж}}}, \quad (3.37)$$

где $U_{\text{ж}} = L/3600$ - скорость жидкости, м/с.

В орошаемом аппарате погрешность расчетных данных по уравнению (3.30) с экспериментальными (рисунки 3.8-3.11) составила $\pm 15\%$.

Количество жидкости, удерживаемой в аппарате и газосодержание слоя. В орошаемых аппаратах количество жидкости удерживаемой насадкой относятся к числу основных гидродинамических характеристик. Количество удерживаемой жидкости складывается из статической и динамической составляющих, причем статическая составляющая определяется формой и материалом насадки, а также свойствами орошающей жидкости, тогда как динамическая составляющая определяется гидродинамическими условиями [3, с.333].

Нами для вывода уравнения количества жидкости, удерживаемой в аппарате, как и в работах [68 с.70, 97 с.76], использован упрощенный подход, основанный на известном соотношении между гидравлическим сопротивлением и величиной столба жидкости, удерживаемой газовым потоком [98]:

$$\xi_L \cdot \frac{H}{d_{\text{экв}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma} W_{\Gamma}^2}{2 \varepsilon_0^2} = \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot h_o. \quad (3.38)$$

Отсюда получим формулу для расчета количества удерживаемой жидкости (КУЖ) в аппарате с регулярной вращающейся насадкой в следующем виде:

$$h_o = B_h \cdot \xi_L \cdot \frac{H}{d_{\text{экв}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma} W_{\Gamma}^2}{2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot \varepsilon_0^2} \quad (3.39)$$

где $B_h=0,476$ – опытный коэффициент.

Погрешность расчетных данных по уравнению (3.39) с экспериментальными (рисунки 3.8-3.9) составила $\pm 14\%$.

Газосодержание слоя определим расчетным путем, как отношение объема, занятого газом $V_{г}$, к общему объему слоя $V_{сл}$ [61, с.97]:

$$\varphi = \frac{V_{г}}{V_{сл}} = \frac{V_{сл} - V_{жс} - V_{н}}{V_{сл}} \quad (3.40)$$

Здесь $V_{сл} = H \cdot S_{ан}$ – объем слоя; $V_{жс} = h_o \cdot S_{ан}$ – объем жидкости, находящейся в насадочной зоне аппарата; $V_{н} = V_{н.э} \cdot n_{э}$ – объем насадки ($V_{н.э}$ – объем насадочного элемента; $n_{э}$ – количество насадочных элементов). Подставляя значения объемов слоя, жидкости и насадки в уравнение (3.40) получим уравнение для расчета газосодержания слоя в следующем виде:

$$\varphi = \varepsilon - \frac{h_o}{H} \quad (3.41)$$

Здесь ε – объемная порозность вращающейся насадки.

3.4 Структура потоков и расчет структурных составляющих жидкой фазы

В противоточном аппарате газовый поток поступает снизу и движется вверх. Жидкость подается в верхней части аппарата и стекает вниз. Взаимодействие газа и жидкости происходит в объеме насадочной зоны, состоящей из регулярно расположенных вращающихся насадочных элементов.

Особенностью конструкции исследуемой вращающейся насадки является наличие обода, закрепленного на свободных концах лопастей. Поэтому, поступающая на элемент насадки жидкость вначале попадает на лопасти, а затем в виде пленки движется к периферии, достигает обода, изменяет направление движения на вертикальное и на срезе обода дробится [99].

Известно [100], что в форсунках с вращающимся распылителем пленка образуется при вращении диска или барабана, во внутреннюю полость которого подается жидкость. Пленка при стекании с кромок диска или барабана становится неустойчивой и распадается на капли. Установлено [100, с.111], что существует три режима распыливания жидкости в зависимости от ее расхода.

При малых расходах жидкости (первый режим распыливания) на периферии диска (барабана) образуется жидкое кольцо, на котором развиваются местные возмущения. Возмущенный участок кольца преобразуется в отросток, который вытягивается в сферическую головку с тонкой соединительной перемычкой. Эта головка отделяется, образуя первую каплю, а перемычка распадается с образованием мелких капелек-спутников.

При увеличении расхода жидкости возникает второй режим распыливания, при котором отростки на кольце принимают форму длинных нитей. На некотором расстоянии от периферии диска (барабана) нити распадаются на

капли примерно одинаковых размеров, а тонкие перемычки между ними – на более мелкие капли-спутники.

Когда нити не могут пропустить всю жидкость из кольца на кромке, это кольцо сбрасывается с кромки, образуя пленку. Наступает третий режим распыливания, когда пленка распадается на капли различных размеров.

Жидкостное кольцо, образующееся на внутренней стороне обода исследуемой насадки, в полной мере реализует механизмы, описанные применительно к дискам и барабанам.

Известно [101], что движение жидкой пленки по поверхности вращающегося элемента является достаточно сложным и в общем случае описывается системой дифференциальных уравнений Навье-Стокса и уравнением неразрывности, решение которой представляет большие математические трудности.

В работах [100, с.125-129] показано, что в связи с малой толщиной пленки, образующейся на поверхности вращающегося элемента (диска, барабана), небольшими тангенциальными и вертикальными составляющими скорости в сравнении с радиальными, эту систему можно существенно упростить и свести ее к уравнению движения:

$$\frac{\partial g_r}{\xi^2 \cdot \partial \psi^2} + \frac{\rho_{ж} \omega_{вр}^2 \cdot \xi}{\mu_{ж}} \cdot \sin^2 \alpha = 0 \quad (3.42)$$

при следующих граничных условиях:

$$\begin{array}{l} \text{на стенке} \quad g_r = 0 \quad \psi = 0 \\ \text{на свободной поверхности} \quad \frac{\partial g_r}{\xi \cdot \partial \psi} = 0 \quad \psi = \psi_1 \end{array} \quad (3.43)$$

где g_r - радиальная составляющая скорости, м/с; ξ - осевая координата на свободной поверхности.

Для решения уравнения (3.42) введем обозначения:

$$\frac{\partial g_r}{\partial \psi} = K, \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial^2 g_r}{\partial \psi^2} = \frac{\partial K}{\partial \psi}. \quad (3.45)$$

С учетом этих обозначений уравнение (3.42) запишем следующим образом:

$$\frac{\partial K}{\xi^2 \partial \psi} + \frac{\rho_{ж} \omega_{вр}^2 \cdot \xi}{\mu_{ж}} \cdot \sin^2 \alpha = 0 \quad (3.46)$$

Откуда после интегрирования:

$$K = -\frac{\rho_{\text{ж}} \omega_{\text{вр}}^2 \cdot \xi^3}{\mu_{\text{ж}}} \cdot \psi \cdot \sin^2 \alpha + C. \quad (3.47)$$

Подставляя (3.47) в уравнение (3.44), получим:

$$\frac{\partial g_r}{\partial \psi} = -\left[\frac{\rho_{\text{ж}} \omega_{\text{вр}}^2 \cdot \xi^3}{\mu_{\text{ж}}} \cdot \psi \cdot \sin^2 \alpha \right] \psi + C. \quad (3.48)$$

Решение уравнения (3.46) с учетом граничных условий имеет вид:

$$g_r = \frac{\rho_{\text{ж}} \omega_{\text{вр}}^2}{\mu_{\text{ж}}} \cdot \sin^2 \alpha \left(\xi_1^3 \psi_1 \cdot \psi - \frac{\xi^3 \psi^2}{2} \right). \quad (3.49)$$

Величина ψ_1 определяется из условия, что расход жидкости в слое равен расходу жидкости на насадочном элементе.

$$Q = \int_0^{\psi_1} 2\pi \cdot r \cdot \xi \cdot \frac{\rho_{\text{ж}} \omega_{\text{вр}}^2}{\mu_{\text{ж}}} \cdot \sin^2 \alpha \left(\xi_1^3 \psi_1 \cdot \psi - \frac{\xi^3 \psi^2}{2} \right) d\psi. \quad (3.50)$$

Проведя интегрирование, получим:

$$Q = \frac{2\pi \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \omega_{\text{вр}}^2 \cdot \sin^3 \alpha \cdot \psi_1^3}{3\mu_{\text{ж}}}. \quad (3.51)$$

В исследуемой конструкции насадки общее количество жидкости, попавшей на лопасти, перемещается на внутреннюю поверхность обода.

Обозначив:

$$\delta_{\text{нл}}^{\text{об}} = \xi_1 \cdot \psi_1; \quad (3.52)$$

$$r = \xi_1 \cdot \sin \alpha; \quad (3.53)$$

$$Q = U_{\text{ж}} S_{\text{об}}, \quad (3.54)$$

и проводя необходимые преобразования, получим уравнение толщины пленки жидкости на поверхности вращающегося элемента:

$$\delta_{\text{нл}}^{\text{об}} = \left(\frac{3\mu_{\text{ж}} \cdot U_{\text{ж}} \cdot S_{\text{об}}}{2\pi \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \omega_{\text{вр}}^2 \cdot r^2 \cdot \sin \alpha} \right)^{1/3} \quad (3.55)$$

Подставляя значение площади лопастей $8 \cdot \pi \cdot r^2 = S_{\text{лоп}}$, и заменяя $\nu_{\text{ж}} = \frac{\mu_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}$, получим:

$$\delta_{nl}^{об} = \left(\frac{3 \cdot v_{ж} \cdot U_{ж} \cdot S_{об}}{2 \cdot \omega_{вр}^2 \cdot \sin \alpha \cdot S_{лоп}} \right)^{1/3} \quad (3.56)$$

В уравнении (3.56) обозначим $B_s = \frac{S_{об}}{S_{лоп}}$, тогда оно окончательно примет вид:

$$\delta_{nl}^{об} = \left(\frac{3 \cdot v_{ж} \cdot U_{ж} \cdot B_s}{2 \cdot \omega_{вр}^2 \cdot \sin \alpha} \right)^{1/3} \quad (3.57)$$

Как отмечалось ранее [100, с.123] в форсунках с вращающимся распылителем в виде диска или барабана на их поверхности образуется пленка жидкости, которая, достигая кромок, становится неустойчивой и распадается на капли. В зависимости от расхода пленка жидкости распадается на отростки со сферической головкой (малый расход жидкости), на длинные нити (средний расход жидкости) и сбрасывается сама пленка (большой расход жидкости). При всех расходах, в конечном счете, образуются капли, а из тонких перемычек мелкие капли-спутники.

Визуальные наблюдения за работой исследуемой вращающейся насадки в диапазоне плотностей орошения от 15 до 75 м³/м²ч и скоростей газа 3-5 м/с показали, что для нее характерен второй режим распыливания с образованием нитей.

Известно [100, с.125-129], что при истечении жидкости в виде струи на ее поверхности возникают волны, распространяющиеся вдоль струи. Причем распад вызывается волнами, которые имеют наиболее быстро нарастающую во времени амплитуду. Определим длину такой волны.

Примем, что происходят осесимметричные колебания, это справедливо при числе Вебера $We_{стр} \ll 1$ [100, с.125-129]. Для этого случая квадрат инкремента колебаний имеет вид:

$$Z_{0i}^2 = m^2 \cdot We_{стр} - m^3, \quad (3.58)$$

в котором m - безразмерное волновое число:

$$m = r_{стр} \cdot \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (3.59)$$

Здесь $r_{стр}$ - радиус струи; λ - длина волны.

Согласно [100, с.125-129], при $We_{стр} \rightarrow 0$ $Z_{0i}^2 \rightarrow 0$. Тогда из (3.58) имеем:

$$m = We_{стр} = \frac{U_{стр}^2 \cdot r_{стр} \cdot \rho_{г}}{\sigma}, \quad (3.60)$$

где $U_{стр}$ - скорость струи жидкости, м/с;

Из условий (3.59) и (3.60) определим длину волны:

$$\lambda = \frac{2\pi\sigma}{U_{стр}^2 \cdot \rho_{\Gamma}}. \quad (3.61)$$

В то же время длина нераспавшейся струи для маловязких жидкостей может быть определена [100, с.125-129] по формуле:

$$\frac{L_c}{\left(d_{об}/2\right)} = 2,3 \left(\frac{Q_{ж}^6 \cdot \rho_{ж}}{\left(d_{об}/2\right)^{15} \cdot \omega_{вр}^2 \cdot \sigma} \right)^{0,143}. \quad (3.62)$$

В условиях, когда $We_{стр} \ll 1$, можно принять $L_c \approx \lambda$. Тогда из (3.61) и (3.62) после преобразований получим:

$$U_{стр} = 1,01 \cdot \left(\frac{\sigma^{1,143} \cdot \omega_{вр}^{0,572}}{\left(d_{об}/2\right)^{0,571} \cdot U_{жс}^{0,858} \cdot \rho_{жс}^{0,143} \cdot \rho_{\Gamma}} \right)^{0,5}. \quad (3.63)$$

В результате исследования перехода от капельного истечения к струйному при распыливании жидкости вращающимися дисками была получена формула [100, с.125-129] для определения радиуса струи:

$$r_{стр} = \left(\frac{2 \cdot \sigma}{\pi \cdot \rho_{жс} \cdot \left(d_{об}/2\right) \cdot \omega_{вр}^2} \right)^{0,5}. \quad (3.64)$$

откуда диаметр струй жидкости:

$$d_{стр} = 1,6 \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_{жс} \cdot \left(d_{об}/2\right) \cdot \omega_{вр}^2} \right)^{0,5}. \quad (3.65)$$

Для определения диаметра капель принимаем: образование капель происходит при дроблении струек под действием вихрей, возникающих при обтекании насадочных элементов, вдали от пристенных слоев сплошной среды; капли в момент формирования имеют сферическую форму с однородным поверхностным натяжением; скорости дробления и коалесценции капель одинаковы, что справедливо при последовательном и многократном дроблении

образующихся струек [102].

Диаметр капель, образующихся при распаде струй жидкости, определим из условия равновесия сил, действующих на каплю:

$$\sigma \cdot S_k = m_b \cdot \frac{(\bar{U}')^2}{2}, \quad (3.66)$$

где в левой части - силы поверхностного натяжения, а в правой - динамический напор, действующий изнутри на поверхность раздела, обусловленный изменением пульсационных скоростей на расстоянии λ . Площадь сечения капли S_k рассчитываем по уравнению:

$$S_k = \frac{\pi d_k^2}{4}. \quad (3.67)$$

Массу с длиной λ , определим по формуле:

$$m_b = \frac{\pi d_{cmp}^2}{4} \cdot \rho_{ж} \cdot \lambda. \quad (3.68)$$

Среднюю пульсационную скорость \bar{U}' находим по уравнению [96, с.228]:

$$\bar{U}' = \mathfrak{E}^{1/3} \cdot \ell^{1/3} = \mathfrak{E}^{1/3} \cdot d_k^{1/3} \quad (3.69)$$

где ℓ - масштаб пульсаций, соизмеримый с диаметром капли, т.е. $\ell = d_k$.

Энергию диссипации вихрей \mathfrak{E} , образующихся при обтекании струй жидкости, определим как:

$$\mathfrak{E} = \frac{N_b}{V_{cmp} \cdot \rho_{ж}}, \quad (3.70)$$

где N_b - мощность вихрей, образующихся при обтекании струй жидкости:

$$N_b = \xi_L \cdot d_{cmp} \cdot \lambda \cdot \rho_{ж} \frac{U_{\Gamma}^3}{2}. \quad (3.71)$$

Объем струй жидкости с диаметром d_{cmp} и длиной λ , определим по формуле:

$$V_{cmp} = \frac{\pi \cdot d_{cmp}^2}{4} \cdot \lambda. \quad (3.72)$$

Подставляя выражения (3.67), (3.68) и (3.69) с учетом (3.70), (3.71), (3.72) в

уравнение (3,66) и решая относительно d_k , получим:

$$d_k = B_k \cdot \xi_L^{1/3} \cdot \frac{\rho_{ж}^{1/6} \cdot d_{стр}^{2/3} \cdot \sigma^{1/3} \cdot U_{\Gamma}}{U_{стр}^{5/3} \cdot \rho_{\Gamma}^{1.2}}. \quad (3.72)$$

здесь $B_k=0,925$ - корректирующий коэффициент.

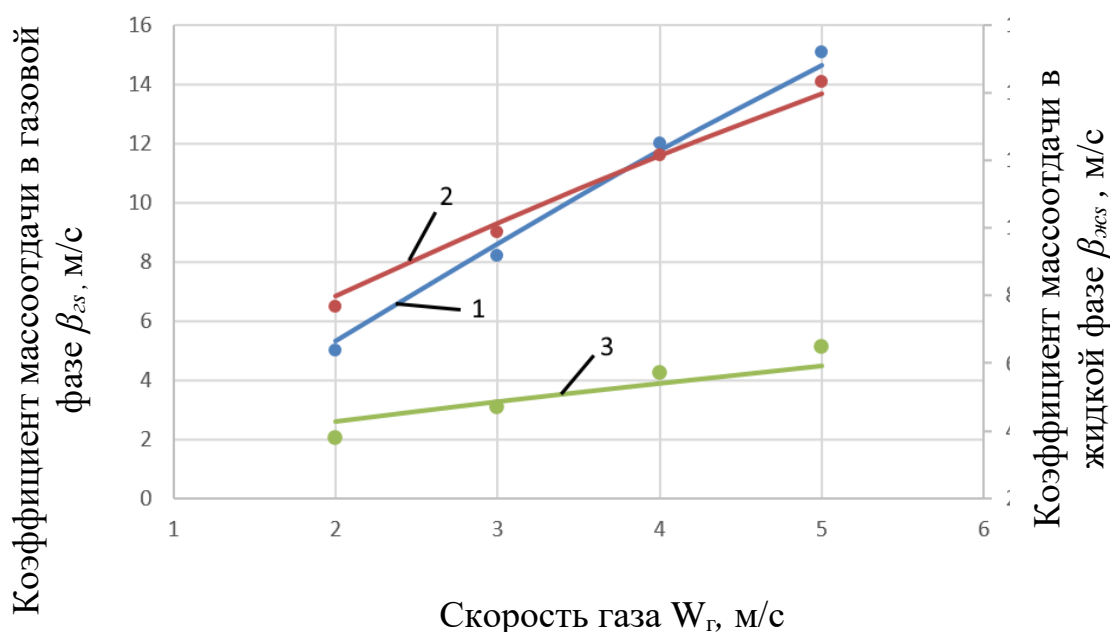
Полученные уравнения $\delta_{пл}$, $U_{стр}$, $d_{стр}$ и d_k учитывают особенности режимных параметров через U_{Γ} и $U_{ж}$, параметров движения через $\omega_{вр}$, конструктивные особенности расположения орошаемых насадочных элементов и физические свойства сплошной и дисперсной фаз через $\rho_{ж}$, ρ_{Γ} , $\nu_{ж}$, ν_{Γ} и σ .

4 МАССООБМЕН В АППАРАТЕ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ НАСАДОЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

4.1 Влияние режимных и конструктивных параметров на коэффициенты массоотдачи в газовой и жидкой фазах

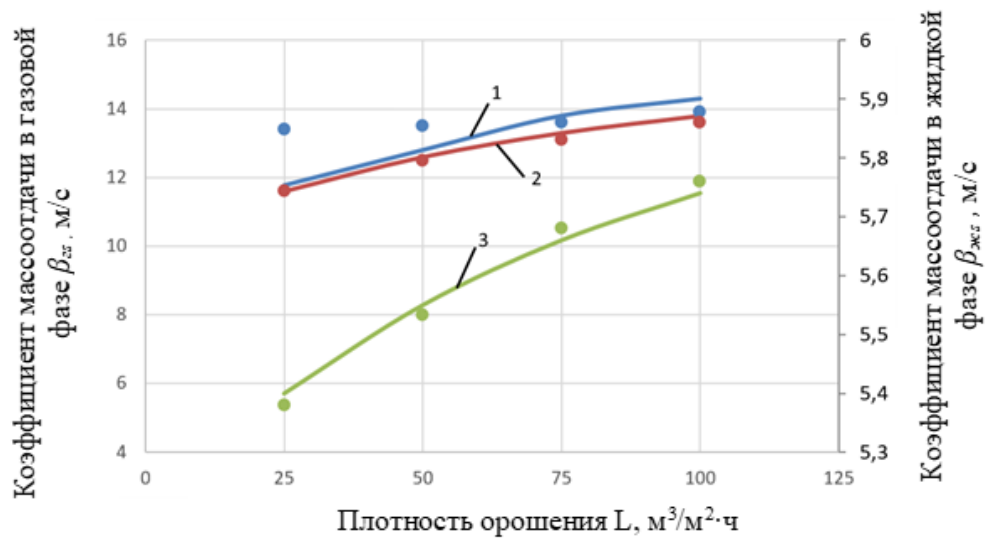
Для аппаратов с регулярным расположением насадочных элементов характерным является движение газового потока сплошным потоком, тогда как жидкость находится в дисперсном состоянии. Вихревое взаимодействие газа и жидкости в объеме контактной зоны способствует многократному дроблению капель, струй и пленок жидкости, выравниванию концентраций внутри капель, создавая при этом развитую межфазную поверхность. Пульсации газожидкостного потока, возникающие при отрыве вихрей, приводят к колебаниям свободной поверхности капель жидкости и периодическому изменению ее формы. Отсюда следует, что частота пульсаций определяет скорость обновления поверхности раздела фаз, а в итоге скорость массообмена.

Рассмотрим влияние режимных параметров на коэффициенты массоотдачи в газовой и жидкой фазах. На рисунках 4.1 и 4.2 представлены графики зависимостей коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах при изменении скорости газа и плотности орошения.



Условия опытов: вращающаяся насадка ВПЛ: $t_b = 3,5d_{об}$; $t_p = 2d_{об}$; $d_{об} = 50$ мм; вращающаяся насадка РПКр: $t_b = 3,5d$; $t_p = 2d$; $d = 80$ мм; $L = 25$ м³/м²ч. Кривые – расчет; точки – эксперимент. 1 и 2 - $\beta_{гс}$ насадок ВПЛ и РПКр [61]; 3 - $\beta_{жс}$ насадки ВПЛ.

Рисунок 4.1 - Зависимость коэффициентов массоотдачи в газовой $\beta_{гс}$ и жидкой $\beta_{жс}$ фазах вращающихся насадок ВПЛ и РПКр от скорости газа W_g



Условия опытов: см. рисунок 4.1. $W_r=4$ м/с. Кривые – расчет; точки – эксперимент. 1 и 2 - $\beta_{гс}$ насадок ВПЛ и РПВКр [61]; 3 - $\beta_{жс}$ насадки ВПЛ.

Рисунок 4.2 - Зависимость коэффициентов массоотдачи в газовой $\beta_{гс}$ и жидкой $\beta_{жс}$ фазах вращающихся насадок ВПЛ и РПВКр от плотности орошения L

Анализ графических зависимостей коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах при изменении скорости газового потока (рисунок 4.1) показывает, что интенсивность массообмена растет с увеличением скорости газового потока. Это связано с тем, что при повышении скорости газа происходит значительная турбулизация потоков, снижающая диффузионное сопротивление. При этом также уменьшается средний диаметр капель, а, следовательно, растет межфазная поверхность.

Вращение насадочных элементов (ВПЛ и РПВКр) способствует дальнейшему росту коэффициентов массоотдачи $\beta_{гс}$ и $\beta_{жс}$. Увеличение скорости газа приводит к росту частоты вращения элементов, снижению толщины пленки и диаметра образующихся капель, что несомненно приводит к увеличению межфазной поверхности.

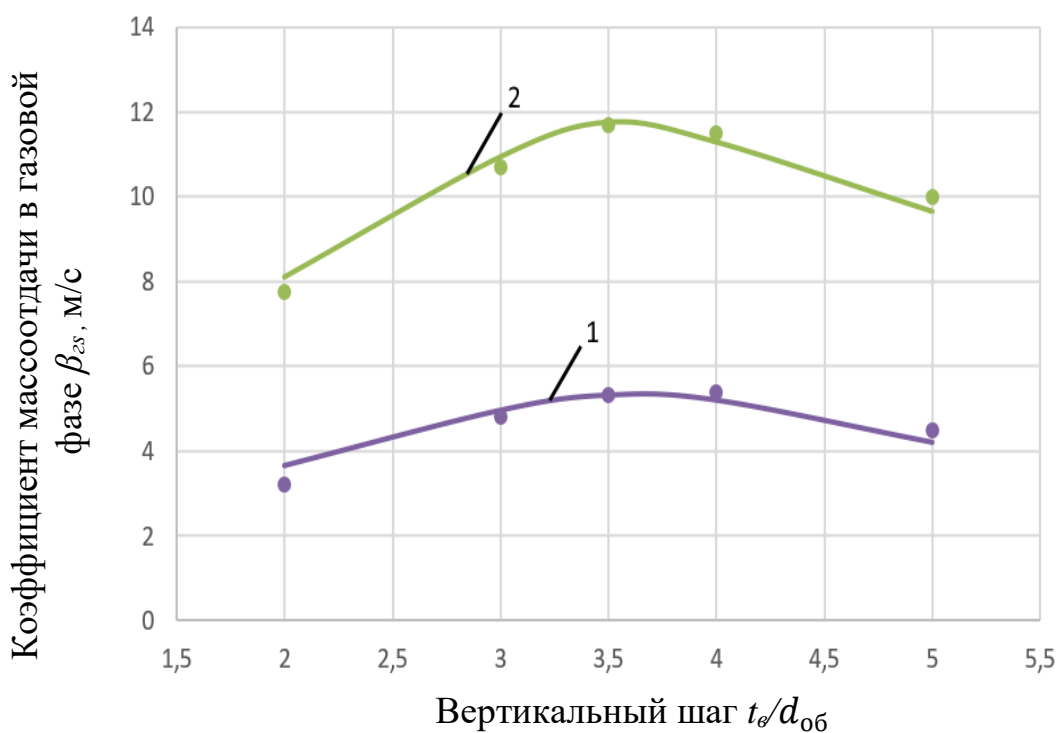
В случае массообмена, лимитируемого сопротивлением газовой фазы выбирают по возможности более высокие скорости газа, в случае же, когда сопротивление лимитируется жидкой фазой, скорость газового потока играет менее существенную роль. Наиболее эффективна работа аппаратов с регулярной подвижной насадкой в капельном режиме. Здесь возможно достижение высоких значений коэффициентов массоотдачи в газовой $\beta_{гс}$ и жидкой $\beta_{жс}$ фазах при условии допустимого брызгоуноса [61, с.138].

Значения коэффициентов массоотдачи в газовой $\beta_{гс}$ и жидкой $\beta_{жс}$ фазах с увеличением плотности орошения L растут (рисунок 4.2). Это связано с тем, что поверхность контакта фаз в значительной мере определяется поверхностью капель жидкости, количество которых увеличивается с ростом L . В свою очередь, рост количества капель обусловлен увеличением скорости движения жидкости по насадке и интенсивностью притока свежей жидкости в зону

контакта. Вращение насадочных элементов способствует турбулизации газожидкостного потока и облегчает дробление пленок на струйки и капли.

Известно [61, с.139], что увеличение плотности орошения при абсорбции хорошо растворимых газов незначительно влияет на эффективность и при повышенных значениях вызывает дополнительные расходы на перекачку жидкости. При плохо растворимых газах увеличение плотности орошения ведет к возрастанию коэффициентов массопередачи в жидкой фазе и в этом случае часто целесообразно применение более высоких плотностей орошения.

На процессы массообмена существенное влияние оказывает взаимное расположение насадочных элементов. На рисунках 4.3 и 4.4 представлены графики зависимостей коэффициентов массоотдачи в газовой фазе от шагов размещения элементов насадки в вертикальном $t_{\theta}/d_{об}$ и радиальном $t_p/d_{об}$ направлениях.

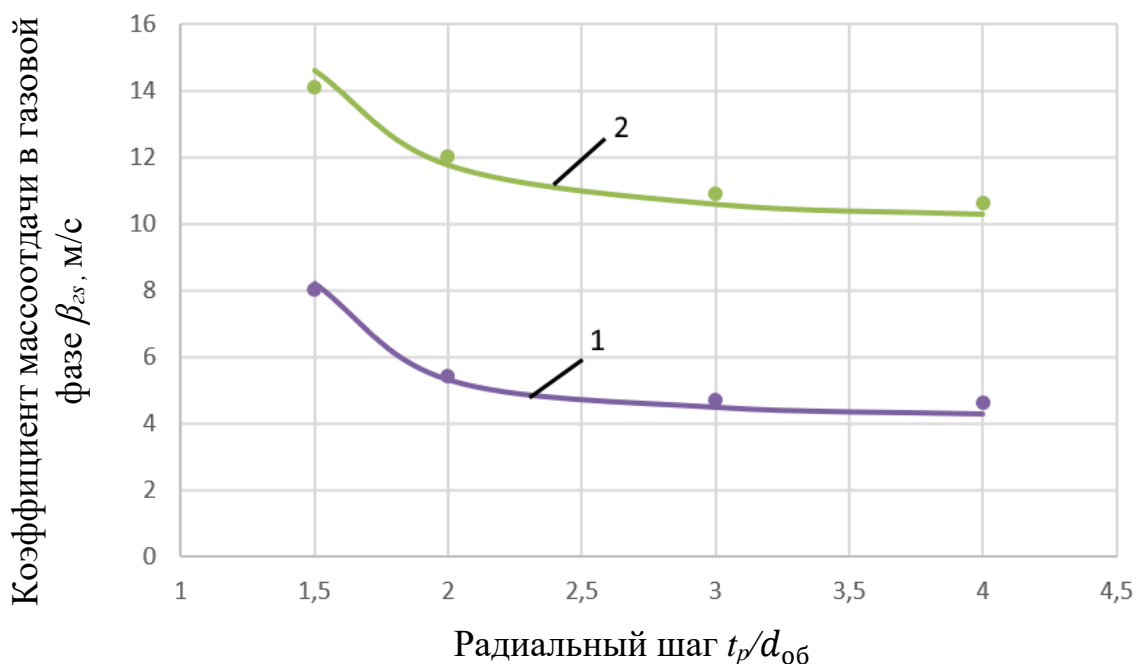


Условия опытов: $t_p=2d_{об}$; $d_{об} = 50$ мм; $L=25$ м³/м²ч.

Кривые – расчет; точки – эксперимент.

1 и 2 - β_{2s} насадки ВПЛ при $W_r=2$ и 4 м/с.

Рисунок 4.3 – Зависимость коэффициентов массоотдачи в газовой фазе β_{2s} насадки ВПЛ от шагов расположения элементов насадки в вертикальном направлении $t_{\theta}/d_{об}$



Условия опытов: см. рисунок 4.3. $t_{\theta}/d_{об}=3,5$. Кривые – расчет; точки – эксперимент. 1 и 2 - β_{2s} насадки ВПЛ при $W_r=2$ и 4 м/с.

Рисунок 4.4 – Зависимость коэффициентов массоотдачи в газовой фазе β_{2s} насадки ВПЛ от шагов расположения элементов насадки в радиальном направлении $t_p/d_{об}$

Как видно из рисунка 4.3 характер изменения кривых $\beta_{2s} = f(t_{\theta}/d_{об})$ аналогичен кривым $\Delta P_L = f(t_{\theta}/d_{об})$ (рисунок 3.10). Периодный режим, характерный для аппаратов с регулярной вращающейся насадкой (ВПЛ и РПВКр) характеризуются более высокими значениями коэффициентов массоотдачи в газовой фазе. Необходимо отметить, что экстремальные значения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе насадок ВПЛ и РПВКр [61, с.142] приходятся на $t_{\theta}/d_{об}=3,5$, что связано с круглой формой насадочных элементов. Максимальное количество вихрей, воспроизводимых в этом режиме, рост их мощности, способствует интенсивному развитию межфазной поверхности за счет большого количества дробильных капель и пленок, что позволяет значительно интенсифицировать процессы массообмена. Несинфазность в вихреобразовании приводит к снижению коэффициентов β_{2s} .

Из рисунка 4.4 видно, что характер изменения кривых $\beta_{2s} = f(t_p/d_{об})$ аналогичен кривым $\Delta P_L = f(t_p/d_{об})$ (рисунок 3.11). В диапазоне $t_p/d_{об}$ от 1,5 до 2 происходит резкое падение значений коэффициентов массоотдачи в газовой фазе, тогда как при $t_p/d_{об} > 2$ падение кривых происходит более плавно. Повышенные значения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе β_{2s} при $t_p/d_{об}$ от 1,5 до 2 обусловлены значительной турбулизацией газожидкостного потока вихрями, количество которых возрастает пропорционально ширине зазора

между обтекаемыми элементами [61, с.143]. В данном случае возрастает количество удерживаемой жидкости и растет гидравлическое сопротивление.

4.2 Расчет коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах

Расчет коэффициентов массоотдачи в газовой фазе

Слой вращающейся насадки представляет собой систему регулярно расположенных обтекаемых тел и поэтому при взаимодействии в нем газового потока и жидкости генерируется пульсационное движение всего слоя.

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 [3 с.87]:

$$\frac{\beta_{gs}}{U_c} = \frac{\lambda_{mp}}{8} \cdot Sc^{1/3}, \quad (4.1)$$

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

В работе [75, с.50], 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 [103] 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 $1-\phi$. На этом основании можно утверждать, что $\beta_c \sim \xi$ и $\beta_{gs} \sim \xi$. Тогда при капельном течении:

$$\frac{\beta_c}{U_k} = \frac{\xi_k}{8} Sc_c^{1/3}, \quad (4.2)$$

где U_k – скорость капель; ξ_k – 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. Балабековым О.С. [104] дано уравнение для определения коэффициента формы капли, которое использовано им при расчете скорости массообмена в сплошной фазе. Оно имеет следующий вид:

$$\Phi = \frac{2v}{d_k} = kWe^{1/5}, \quad (4.3)$$

где v – малая полуось эллипсоидной капли; k – коэффициент пропорциональности, равный 1,1.

Число Вебера We :

$$We = \frac{U_k^2 d_k \rho_k}{\sigma}. \quad (4.4)$$

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

$$C_k = C_{ш} \cdot \Phi^2, \quad (4.5)$$

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 регулярной насадкой режимы движения капель соответствуют диапазону $100 \leq Re_{к.з.} \leq 800$, в котором

$$C_{ш} = \frac{13}{Re_{к.з.}^{0,5}}, \quad (4.6)$$

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

$$Re_{к.з.} = \frac{U_k d_k}{\nu_z}, \quad (4.7)$$

Тогда, на основании уравнения (4.1) получим:

$$\beta_\Gamma = 1,625 \cdot \frac{U_k^{1/2} \cdot \nu_\Gamma^{5/6} \cdot \Phi^2}{d_k^{1/2} \cdot D_\Gamma^{1/3}}. \quad (4.8)$$

Учитывая коэффициент сопротивления насадки ξ_L получим:

$$\beta_{\Gamma S} = B_m \cdot \xi_L \cdot \frac{U_k^{1/2} \cdot \nu_\Gamma^{5/6} \cdot \Phi^2}{d_k^{1/2} \cdot D_\Gamma^{1/3}}, \quad (4.9)$$

где $B_m = 2,25 \cdot \left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/2}$ – коэффициент корреляции.

Расчет коэффициентов массоотдачи в жидкой фазе

Известно [105], что энергия основного потока диссипируется по механизму

каскадного переноса энергии. Согласно этому механизму, энергия пульсаций соизмеримыми с диаметром D или высотой рабочей зоны аппарата L передается во все меньшие масштабы, пока не диссипируется в масштабах порядка ℓ_0 . При этом размеры образованных вихрей станут столь малыми, что они почти мгновенно будут исчезать под действием вязкости. Масштаб пульсаций ℓ_0 называют внутренним масштабом турбулентности. Этот масштаб, согласно теории локально-изотропной турбулентности Колмогорова - Обухова [106-108] может быть определен по выражению:

$$\ell_0 = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}, \quad (4.10)$$

где ε – скорость диссипации энергии, Вт/кг.

Из рассмотренного механизма каскадного переноса энергии следует, что мелкие вихри, соизмеримые с масштабом ℓ_0 ответственны за массообмен, который вследствие малых времен контакта протекает нестационарно. Тогда, как и в других моделях нестационарной диффузии [109,110] скорость массообмена будет определяться, главным образом, временем контакта фаз Δt и величиной коэффициента молекулярной диффузии D .

Основываясь на предложенном механизме образования вихрей, и, связывая его с волновым движением, в работе [61, с.149] получено уравнение для расчета времени контакта фаз Δt :

$$\Delta t \approx 2\pi \cdot \left(\frac{v}{\varepsilon} \right)^{1/2}. \quad (4.11)$$

Хигби [111] для расчета коэффициента массоотдачи в жидкой фазе предложил следующее уравнение:

$$\beta_{ж} = 2 \sqrt{\frac{D_{ж}}{\pi \cdot \Delta t}}, \quad (4.12)$$

где $D_{ж}$ – коэффициент молекулярной диффузии жидкости, м²/с.

Из уравнения (4.12) с учетом соотношения (4.11), имеем:

$$\beta_{жс} \sim \frac{\varepsilon^{1/4} \cdot D_{жс}^{1/2}}{v_{жс}^{1/4}}. \quad (4.13)$$

Вышеизложенное свидетельствует о возможности использования для расчета коэффициента массоотдачи в жидкой фазе уравнения:

$$\beta_{жс} = B_{жс} \frac{\mathfrak{E}^{1/4} \cdot D_{жс}^{1/2}}{V_{жс}^{1/4}} \quad (4.14)$$

$B_{жс}$ – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально.

Анализ уравнения (4.14) показывает, что задача ее решения сводится к определению скорости диссипации кинетической энергии вихрей. Скорость диссипации энергии вихрей, образующихся при обтекании элементов вращающейся насадки, определим, учитывая, что рабочая зона аппарата является совокупностью отдельных ячеек:

$$\mathfrak{E}_{яч} = \frac{N_{\epsilon}}{V_{жс.яч} \cdot \rho_{жс}} \quad (4.15)$$

Мощность вихрей, образующихся при обтекании насадочных элементов [61, с.150]:

$$N_{\epsilon} = \xi_L \cdot S_{эл} \cdot \rho_2 \cdot U_2^3 / 2 \quad (4.16)$$

Объем жидкости в ячейке:

$$V_{жс.яч} = t_g \cdot t_p^2 \cdot (1 - \varphi_{яч}), \quad (4.17)$$

где $\varphi_{яч} = 1 - \frac{h_k}{t_g}$ – газосодержание слоя в ячейке.

В работе [61, с.100] для расчета количества удерживаемой жидкости (КУЖ) использовано уравнение, учитывающее долю вклада пленочной и капельной составляющих:

$$h_0 = (h_{пл} + h_k) \cdot \frac{H}{t_b} \quad (4.18)$$

Капельную составляющую в общем количестве удерживаемой жидкости определим по формуле:

$$h_{пл} = \delta_{пл} \cdot S_{эл} / t_p^2 \quad (4.19)$$

Тогда капельную составляющую КУЖ можно определить из уравнения (4.18):

$$h_k = \frac{t_b}{H} \cdot h_0 - h_{пл} \quad (4.20)$$

После подстановки (4.16) и (4.17) в уравнение (4.15) получим:

$$\Theta_{\text{яч}} = \xi_L \cdot \frac{(1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varphi_{\text{яч}})} \cdot \frac{\rho_{\Gamma} \cdot U_{\Gamma}^3}{2 \cdot t_{\varepsilon} \cdot \rho_{\text{ж}}} \quad (4.21)$$

Решая уравнение (4.14) с учетом выражения (4.21), получим уравнение для расчета коэффициента массотдачи в жидкой фазе:

$$\beta_{\text{жс}} = B_{\text{ж}} \cdot \left[\xi_L \cdot \frac{(1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varphi_{\text{яч}})} \cdot \frac{K_{\rho} \cdot D_{\text{жс}}^2 \cdot U_{\Gamma}^3}{t_{\varepsilon} \cdot \nu_{\text{ж}}} \right]^{1/4}, \quad (4.22)$$

где $B_{\text{ж}} = 30,94 \cdot \left[\frac{(1 - \varphi)}{\varphi} \right]^{1/4}$ - опытный коэффициент; $K_{\rho} = \rho_{\Gamma} / \rho_{\text{ж}}$ - безразмерная плотность среды.

5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОМЫШЛЕННЫХ АППАРАТОВ С РЕГУЛЯРНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ НАСАДКОЙ

5.1 Рекомендации по проектированию и эксплуатации аппаратов с регулярными вращающимися насадочными элементами и методика расчета.

Современные требования к теплообменным аппаратам изменялись, т.к. менялась концепция по созданию химического, нефтехимического пищевого, энергетического оборудования и колонн нефтегазоперерабатывающих предприятий. Это связано с резким подорожанием энергоресурсов во всем мире и с дефицитом водных ресурсов. Современные теплообменные аппараты должны отвечать следующим требованиям:

1. Энергоемкость. Оценка этого показателя неоднозначна. С одной стороны, энергоемкость связана с затратами на гидравлическое сопротивление при прохождении газовым потоком контактной зоны аппарата. Однако имеются и другие случаи. Например, полые скрубберы имеют относительно низкое сопротивление при низкой интенсивности тепло- и массопереноса. Тогда как для достижения искомой эффективности, например, степени очистки газов, потребуются ставить последовательно несколько таких аппаратов. При этом достижение требуемой интенсивности сомнительно. В то же время увеличится суммарная энергопотребность, а капитальные затраты (стоимость изготовления и монтажа, материалоемкость) возрастут на порядок.

Поэтому при оценке энергоемкости процессов и аппаратов рекомендуется исходить из отношения энергозатрат к интенсивности процесса [112].

2. Высокая эффективность. Этот показатель является наиболее важным. Необходимо разрабатывать новые конструкции аппаратов, реализующих наиболее эффективные механизмы взаимодействия газового потока с жидкостью. К ним относятся вихревой механизм, позволяющий достигать режим одновременного вихреобразования (синфазный режим) в объеме регулярно расположенных насадочных тел, ударный механизм реализующийся в процессе ударного взаимодействия газового потока с покоящейся жидкостью, центробежный механизм, позволяющий в полной мере использовать центробежную силу, скоростной механизм создающий высокоразвитую межфазную поверхность за счет создания высоко диспергированного жидкостного потока, электростатический механизм позволяющий использовать возможности электрического поля и др. Важным условием повышения эффективности является использование вращательного и пульсирующего движения как самих взаимодействующих потоков, так и насадочных элементов.

3. Высокая интенсивность. Выполнение этого требования приводит к снижению габаритов и количества создаваемых аппаратов, т.е. к снижению материалоемкости. Однако при этом могут возрасти энергозатраты и сложность конструкции.

4. Универсальность применения конструкций теплообменных аппаратов. Это современное требование, позволяющее объединить проведение нескольких процессов в одном аппарате. Совмещение или сопряжение различных действий будет способствовать уменьшению количества конструкций до минимума. При этом сократятся и капитальные затраты, и энергоемкость. Действительно такой подход позволит решить многие проблемы. Однако научные основы таких совмещенных или сопряженных процессов еще не созданы.

5. Простота конструкции. На первый взгляд эта задача в современных условиях развития технологии машиностроения и монтажа не должна беспокоить. Однако, отсутствие в Казахстане специализированных в отдельных отраслях промышленности машиностроительных предприятий, проектных и научно-исследовательских институтов усложняет решение этой задачи. Поэтому необходимо ориентироваться на продукцию, выпускаемую в нашей Республике. Кроме того, проектирование и изготовление составных частей колонных аппаратов необходимо планировать из стандартных и нормализованных конструктивных элементов.

6. Простота монтажа, также является немаловажным фактором. Изготовление гирлянд в виде струн с закрепленными на них насадочными элементами или пучка труб, в виде отдельно собираемого блока позволит решить и эту проблему, т.к. сейчас современной технологией сборки является блочная.

7. Простота эксплуатации. Отсутствие движущихся и трущихся частей делает колонные теплообменные аппараты надежной конструкцией. Применительно к аппаратам с регулярной подвижной насадкой возможное отложение твердых примесей на поверхностях насадочных элементов невозможно, т.к. они сами являются источниками турбулизации потоков. Изготовление трубного пучка съемным позволяет повысить ремонтпригодность и чистку поверхности трубок от накипи, возникающей при нарушении технологического режима.

Указанным критериям оценки в большой степени отвечает разработанный нами теплообменный аппарат с регулярной вращающейся насадкой. Проведенные исследования позволили выявить оптимальные значения режимных и конструктивных параметров и разработать рекомендации по проектированию и эксплуатации промышленных аппаратов.

Рекомендуемыми технологическими параметрами являются:

- скорость газового потока $w_2=3,5-4,5$ м/с;

- плотность орошения для хорошо растворимых газов составляет $L=15-25$ м³/м²·ч; для плохо растворимых газов $L=50$ м³/м²·ч и выше.

Рекомендуемыми конструктивными параметрами составляющих вращающейся насадки ВПЛ являются: высота обода - $h_{об}=0,5d_{об}$; толщина обода - $\delta_{об}=0,02d_{об}$; длина лопастей - $l_{л}=0,38d_{об}$; ширина лопастей - $b_{л}=0,5d_{об}$; толщина лопастей - $\delta_{л}=0,02d_{об}$; угол наклона лопастей $\alpha=45^0$; диаметр трубчатого элемента - $d_{тр}=0,2d_{об}$; Внешний диаметр втулки - $d_{втул}=0,18d_{об}$; диаметр оси - $d_{ос}=0,04d_{об}$; внешний диаметр ограничителя - $d_{огр}=0,2d_{об}$.

Рекомендуемыми шагами расположения насадочных элементов являются:

- шаг расположения в вертикальном направлении $t_v=3,5d_{об}$;
- шаг расположения в радиальном направлении $t_p=2d_{об}$.

Рекомендуемая высота и количество секций: минимальная высота секции – 1 м. Для обеспечения заданной эффективности высоту секции увеличивают до 1,5-2 м или устанавливают две секции с разрывом (не менее 0,5 м).

На основании проведенных исследований нами получены уравнения для определения гидродинамических параметров и массообменных характеристик аппарата с регулярными вращающимися насадочными элементами, составляющих инженерную методику расчета.

Таблица 5.1 – Инженерная методика расчета аппарата с регулярными вращающимися насадочными элементами

№ п/п	Рассчитываемые характеристики	Уравнение для расчета
1.	Конструктивные параметры насадки - порозность в сечении аппарата; - объемная порозность; - эквивалентный диаметр.	(3.11) (3.18) (3.24)
2.	Частота вращения насадочных элементов	(3.28)
3.	Гидравлическое сопротивление насадочной зоны	(3.30) с учетом (3.24), (3.31), (3.32), (3.34), (3.35), (3.36) и (3.37)
4.	Количество удерживаемой жидкости	(3.39) с учетом (3.24)
5.	Газосодержание слоя	(3.41) с учетом (3.18) и (3.39)
6.	Структурные составляющие жидкой фазы: - толщина пленки жидкости; - скорость струи жидкости; - диаметр струи жидкости; - диаметр капель жидкости.	(3.57) с учетом (3.28) (3.63) с учетом (3.28) (3.65) с учетом (3.28) (3.72) с учетом (3.63) и (3.65)
7.	Коэффициент массоотдачи в газовой фазе	(4.9) с учетом (3.31) и (3.72)
8.	Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе	(4.22) с учетом (3.11), (3.31) и (3.41)

5.2 Внедрение технической документации «Рекомендации по проектированию и методика расчета тепломассообменного аппарата с регулярной вращающейся насадкой» в производствах хромовых соединений

Разработанный и исследованный в лабораторных условиях тепломассообменный аппарат с регулярной вращающейся насадкой

предназначен для проведения процессов массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания. С целью определения потенциальных мест его применения рассмотрим основные производства хромовых соединений, в которых предусмотрено использование газоочистного оборудования.

Из технологических регламентов АО «Актюбинский завод хромовых соединений» и работы [113] известно, что такими производствами являются:

Производство хромового ангидрида.

Производство хромового ангидрида основано на взаимодействии плава бихромата натрия с концентрированной серной кислотой при нагревании массы до $200 \div 100^\circ\text{C}$. Процесс образования хромового ангидрида протекает в реакторе непрерывного действия, представляющего собой барабан диаметром 1,6 м и длиной 16 м с наклоном 1,7% и вращающейся со скоростью - 4 об/мин. Этот процесс сопровождается выделением газов, содержащих хлор, хлористый хромил, пыль окиси хрома и др.

Аппаратурно-технологическая схема очистки газов, отходящих от реактора хромового ангидрида включает, большой скруббер (диаметр - 1,8 м, высота - 8,5 м), два малых (диаметр - 1,6 м, высота - 7,0 м каждый), каплеуловитель, циркуляционный бак и дымосос. Скруббера эксплуатируются полыми.

Поступающие из реактора в большой скруббер газы орошаются монохроматными щелоками. Форсунки для распыления поглотителя располагаются в два яруса в верхней части скруббера. Для увеличения эффективности очистки газа, после первого скруббера, в выхлопном газовом патрубке и наклонном гахоходе дополнительно установлены форсунки.

Предварительно очищенный (в большом скруббере и орошаемом гахоходе) газ, последовательно проходит два малых полых скруббера. Режим работы первого малого скруббера - нисходящий прямоток, второго - противоток. Орошение малых скрубберов осуществляется также монохроматными щелоками через форсунки, установленные в два яруса в верхней части аппаратов. Слив отработанного раствора из большого скруббера производится в циркуляционную емкость, а из малых скрубберов - в автотравочник. Очищенный газ дымососом через каплеуловитель и санитарную трубу выбрасывается в атмосферу.

Средние предельные значения рабочих параметров составляют: расход газа на входе в скруббер $9900-17500 \text{ м}^3/\text{ч}$; температура газа - после большого скруббера $70-75^\circ\text{C}$; после малых - $60-65^\circ\text{C}$; концентрация улавливаемых компонентов (в пересчете на хром) - после большого скруббера $7,7 \div 9,4 \text{ г}/\text{м}^3$; после малых $0,8 \div 4,8 \text{ г}/\text{м}^3$; степень очистки $87 \div 92\%$. Для орошения используется насос производительностью $60 \text{ м}^3/\text{ч}$. Поглотительный раствор равномерно распределяется на все форсунки трех скрубберов и гахоходов. Представленные результаты показывают невысокую эффективность полых форсуночных скрубберов.

Производство окиси хрома.

Процесс получения окиси хрома включает стадии: приготовление серной суспензии; восстановление хромата натрия в автоклавах расплавленной серой;

отделение гидрированной окиси хрома от тиосульфатного раствора; окислительное прокаливание гидратированной окиси хрома; выщелачивание спека и отделение водорастворимых солей окиси хрома; сушку и фасовку окиси хрома.

Гидроокись хрома перемешивается с хромихроматами и поступает в питатель, откуда пневмодозаторами, через питательную форсунку подается в прокалочную печь. При смешении хромихроматов с гидроокисью хрома адсорбируемая щелочь нейтрализуется, что исключает обратное окисление окиси хрома при прокаливании. При наличии в пасте элементарной серы, она сгорает в прокалочной печи с образованием сернистого газа. Печь обогревается топочными газами, образующимися при сжигании природного газа. Температура в печи поддерживается в пределах 1200-1400⁰С. При этом происходит полное обезвоживание гидроокиси хрома и выгорание серы.

Из печи с дымовыми газами уносится до 16% пыли, которую улавливают в двух последовательно установленных скрубберах, орошаемых тиосульфатным фильтратом после I и II стадии фильтрации гидроокиси хрома. Подача орошающей жидкости осуществляется насосом из сборника.

В качестве скрубберов для очистки газового потока используются полые форсуночные аппараты, эффективность которых составляет не более 50÷60%.

Предельные значения параметров газового потока перед входом в аппараты составили: температура газового потока 500÷800⁰С; расход газового потока 17400÷19390 м³/ч; концентрация пыли в газе 80÷160 г/с.

Производство хромового дубителя восстановлением бихромата натрия диоксидом серы.

Сульфат хрома получают в смеси с сульфатом натрия восстановлением бихромата натрия либо диоксидом серы и солями сульфатного ряда, либо органическими веществами [113, с.235]. В качестве органических восстановителей опробированы сахар, глюкоза, крахмал, мука, глицерин, формалин, сульфатцеллюлозные щелока, дубильные растительные материалы, древесная стружка и опилки. Для приготовления хромовых дубильных растворов исследователями предложены [113, с.236] отбросная кислая смола от очистки минеральных масел серной кислотой, автоклавная жидкость производства фурфурола, пентозная патока. Восстановление органическими продуктами наиболее изученный и распространенный метод получения основного сульфата хрома. Однако он требует применения серной кислоты.

На АО "Актюбинский завод хромовых соединений" впервые создана промышленная установка для выработки хромового дубителя восстановлением бихромата натрия диоксидом серы. Технологический процесс производства включает 6 стадий:

1. Прием сырья.
2. Подача бихроматного раствора в баки восстановления, корректировка концентраций.
3. Подача природной серы в печь, сжигание ее с образованием диоксида серы.

4. Насыщение бихроматного раствора сернистым газом, получение раствора основного сульфата хрома.

5. Сушка раствора.

6. Упаковка продукта, складирование и отгрузка потребителю.

Температура сгорания серы в печи около 650⁰С. Сернистый газ через рекуператор, в котором происходит снижение температуры газа и улавливание несгоревших частиц серы и пыли, поступает в систему газоулавливания, состоящую из 3-х абсорбционных колонн и каплеуловителя.

Первый абсорбер орошается бихроматным раствором, подаваемым насосами из бака циркуляции. Вторая колонна орошается бихроматным раствором, подаваемым насосом из бака циркуляции. Не вступивший в реакцию диоксид серы вместе с отходящими газами проходит дополнительную очистку в третьем аппарате, который орошается бихроматным раствором с помощью насоса из бака орошения (нижняя часть абсорбера). Газы, очищенные от диоксида серы, направляются вентилятором в газопровод - ловушку, где капли воды задерживаются, а газ через санитарную трубу выбрасывается в атмосферу.

Предельные значения параметров имеют вид:

На входе в первый абсорбер: температура газа - 75⁰С; расход газа - 6816 м³/ч (5850 нм³/ч); концентрация SO₂ - 80,4 г/м³.

На входе во второй абсорбер: температура газа - 40⁰С; расход газа - 5667 м³/ч (5106 нм³/ч); концентрация SO₂ - 68,6 г/м³.

На входе в третий абсорбер: температура газа - 20⁰С; расход газа - 11496 м³/ч (10711 нм³/ч); концентрация SO₂ - 0,0805 г/м³.

Производство сульфата хрома. Технологическая схема очистки газов, отходящих от сушилки КС.

Метод производства сульфата хрома (основного) основан на взаимодействии сернистого газа с раствором бихромата натрия. Сернистый газ образуется при сгорании серы в печи. В процессе производства раствор бихромата натрия с концентрацией (230-300) г/л по CrO₃ поступает в колонну восстановления, куда противотоком поступает сернистый газ, образующийся при сжигании серы в печи, результатом чего является образование раствора сульфата хрома. Полученный раствор сульфата хрома поступает на сушку в сушилку «кипящего слоя» (КС), высушенный сульфат хрома поступает на расфасовку.

Из бака-питателя сиропообразный раствор сульфата хрома с концентрацией по CrO₃ (380-415) г/л через форсунку подается в сушилку «кипящего слоя». Сушилка «КС» представляет собой полую емкость с решеткой в нижней части, на которой лежит слой гранулированного сульфата хрома «подушка». Выше решетки установлен дезинтегратор, который служит для размельчения «подушки». Получаемые при сжигании природного газа в топке сушилки топочные газы поступают в нижнюю часть сушилки. В результате интенсивного теплообмена между топочными газами, «подушкой» и раствором сульфата хрома происходит сушка последнего. Температура в сушилке под решеткой за счет разбавления горячих газов холодным воздухом поддерживается на уровне

(145-155)⁰С. Температура в слое (70-75)⁰С. Высушенный сульфат хрома вместе с парогазовой смесью дымососом Д-12 протягивается через группу циклонов, где происходит улавливание основной его части (90-95)% и собирается в бункере циклонов, оттуда через «мигалки» и далее систему шнеков, высушенный сульфат хрома поступает в расходный бункер расфасовочного конвейера.

Парогазовая смесь для более полной очистки проходит орошаемый водой скруббер и ловушку 7, затем выбрасывается через санитарную трубу в атмосферу. На орошение скруббера используется техническая вода. По достижении концентрации (110-120) г/л по CrO₃ растворы из баков орошения сушилок, откачиваются в бак-сборник, откуда по мере необходимости перекачиваются в бак орошения.

Воздух в сушилку «КС» подается воздуходувкой. Часть воздуха идет на форсунку, как «первичный» для сгорания газа, остальной воздух подается непосредственно в топку для разбавления и охлаждения топочных газов.

Проведенные замеры существующей технологической схемы очистки, в которой в качестве окончательной ступени был установлен орошаемый полый скруббер, максимальное снижение концентрации пыли (среднее значение) составило $C_k=0,22\text{г/нм}^3$, что выше нормативного показателя ($C_{\text{норм.}}=0,174\text{ г/нм}^3$).

Описанные производства являются потенциальными местами для внедрения аппарата с регулярной вращающейся насадкой. Для этого нами разработана техническая документация «Рекомендации по проектированию и методика расчета теплообменного аппарата с регулярной вращающейся насадкой» (Приложение В), которая может быть использована в производствах хромовых соединений, получен акт внедрения (Приложение Г) и справка о внедрении (Приложение Д).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткие выводы по результатам диссертационных исследований.

1 На основе анализа конструкций аппаратов с нерегулярными (хаотическими) стационарными насадками, регулярными стационарными насадками, подвижными насадками и регулярными подвижными насадками обоснован выбор объекта исследований - аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом, позволяющего проводить процессы тепло- и массообмена. Сформулированы задачи для проведения исследований и создания научно-обоснованных методов расчета.

2 Для созданной конструкции аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом получены уравнения для определения удельной поверхности насадки, объемной порозности, а также уравнение для расчета эквивалентного диаметра.

3 Проведены исследования параметров вращения насадочных элементов и гидродинамики насадочной зоны аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом и на основе полученных результатов выведены расчетные уравнения частоты вращения насадок, коэффициентов сопротивления, гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя. Получены уравнения для определения средних значений толщины пленки, диаметра струй и размера капель.

4 Проведены исследования массообменных характеристик насадочной зоны аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом и на основе полученных результатов выведены расчетные уравнения коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах.

5 Результаты исследований, полученные расчетные зависимости по гидродинамике и массообмену положены в основу рекомендаций по проектированию и эксплуатации и инженерной методики расчета аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом.

6 Разработанная техническая документация «Рекомендации по проектированию и методика расчета тепломассообменного аппарата с регулярной вращающейся насадкой» принята к использованию в производствах хромовых соединений на АО «Актюбинский завод хромовых соединений». Получены справка и акт внедрения.

Оценка полноты решений поставленных задач. Результаты теоретических исследований, экспериментальное изучение закономерностей взаимодействия газовой и жидкой фаз в контактной зоне регулярной вращающейся насадки с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом, параметров вращения насадочных элементов, гидродинамики, процессов массообмена, разработка технической документации для применения в промышленных условиях полностью соответствуют поставленным в диссертации задачам.

Разработка рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов. Результаты экспериментального изучения параметров вращения насадочных элементов, гидродинамики и процессов массообмена в аппарате с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом, 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 параметров вращения насадочных элементов, основных гидродинамических характеристик и параметров массообмена, а также рекомендации по проектированию промышленных аппаратов, включающих выбор режимных и конструктивных параметров.

Оценка технико-экономической эффективности внедрения. По результатам проведенных исследований разработана техническая документация «Рекомендации по проектированию и методика расчета тепломассообменного аппарата с регулярной вращающейся насадкой», которая принята к использованию в производствах хромовых соединений на АО «Актюбинский завод хромовых соединений». Получены справка и акт внедрения.

Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области. Анализ технико-экономических показателей разработанного и исследованного аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом показывает, что по сравнению с современными аппаратами с нерегулярными (хаотическими) стационарными насадками и регулярными стационарными насадками предлагаемый аппарат имеет в 1,1-1,2 раза ниже гидравлическое сопротивление, в 1,3 выше показатели эффективности и вне конкуренции по такому показателю как нечувствительность к загрязненности обрабатываемых сред.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Изд. 9-е. - М.: Химия, 1973. – 752 с.
- 2 Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др. Под ред. Ю.И. Дытнерского, 2 – е изд. Перераб. и дополн. - М.: Химия, 1991. – 496 с.
- 3 Рамм В.М. Абсорбция газов. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656с.
- 4 Кафаров В.В. Основы массопередачи. – М.: Высшая школа, 1972. –496с.
- 5 Поникаров И.И., Поникаров С.И., Рачковский С.В., Хоменко А.А. Машины и аппараты химических производств и неф-тегазопереработки: Учебник. - Изд. 3-е в электронном варианте - Казань: КНИТУ, 2014.
- 6 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.
- 7 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. - 872 с.
- 8 Городилов А.А. Интенсификация процесса тепломассообмена в контактных аппаратах с регулярной насадкой: дисс. ...канд. техн. наук. - М., 2016. – 142 с.
- 9 Каган А.М. и др. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов: Монография / под ред. А.Г. Лаптева. – Казань: Отечество, 2013. – 454 с.
- 10 Волненко А.А., Жубаниязов Б.Т., Мустафина А.И. Улавливание пыли свинцово-молибдатного крона в аппарате с регулярной подвижной насадкой // Малоотходные технологические процессы и сокращение промышленных выбросов в металлургической промышленности: Сб. тез. докл. Респ. научн.-техн. конф. – Запорожье, 1989. – С.115 – 116.
- 11 Волненко А.А., Балабеков О.С., Кумисбеков С.А. Промышленное использование аппаратов РПН в производстве основного сульфата хрома //Проблемы развития предприятий основной и горной химии: Сб. научн. трудов АО “КазНИИХимпроект” – Шымкент, 1996. – С.226 – 227.
- 12 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.
- 13 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 монокромата натрия // Технические науки: проблемы и решения. Сб. ст. по материалам XXII

между-нар. науч.-практ. конф. - №4(20). – М.: Изд. «Интернаука», 2019. – С. 132-138.

14 A.A. Volnenko, A.E. Leudanski, A.S. Serikov, A.N. Issayeva, D.K. Zhumadullayev. Calculation and implementation of a cyclone-vortex device in chromic sulphate production // NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. –2024. - Vol. №463. - P.80-94.

15 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.

16 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.

17 Балабеков О.С., Балтабаев Л.Ш. Очистка газов в химической промышленности. Процессы и аппараты. – М.: Химия, 1991. – 216 с.

18 Балабеков О.С. Физико-химическая гидродинамика и закон о синфазности вихреобразования. - Шымкент: ЮКГУ им. М.Ауезова, 2001.- 275с.

19 Балабеков О.С., Волненко А.А. Расчет и конструирование теплообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой / Балабеков О.С., Волненко А.А. – Шымкент, 2015. – 184 с.

20 Кумисбеков С.А., Волненко А.А., Серикулы Ж. Аппарат с регулярной пластинчатой вибрирующей насадкой. Разработка и расчет - Шымкент: типография «Алем», 2017. – 122 с.

21 Корганбаев Б.Н. Орталықтан тепкіш-құйынды фазаларының өзара әрекеттесуі бар қарқынды масса алмасу аппараттары / Ред. т.ғ.д. Волненко А.А. - Шымкент: М. О. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, 2024. – 160 б.

22 Патент РК №36475 по заявке №2022/0603.1 от 06.10.2022г. МПК В01D 53/20 (2006.01), 47/14(2006.01). Аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания /Волненко А.А., Сериков А.С., Камалбек Д.К., Абжапбаров А.А., Серикулы Ж., Корганбаев Б.Н., Жумадуллаев Д.К. Опубл. 24.11.23, бюл. №47.

23 Патент РК №37094 по заявке №2023/0783.1 от 19.11.2023г. МПК В01D 53/20 (2006.01), В01D 47/14(2006.01). Аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Сериков А.С., Кумисбеков С.А., Абжапбаров А.А., Корганбаев Б.Н. Опубл. 20.12.24, бюл. №51.

24 Патент РК № 1478, МКИ В 01 D 53/20. Аппарат с насадкой / Волненко А.А., Серманизов С.С., Балабеков О.С. и др. (Республика Казахстан). Опубл. 15.12.94, бюл. №4.– 5с.

- 25 Егоров Н.Н. Охлаждение газа в скрубберах. - М.: Госхимиздат, 1954. – 142 с.
- 26 Maćkowiak J. Fluid dynamics of packed columns; principles of the fluid dynamic of column for gas/liquid and liquid/liquid systems. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 355 p.
- 27 Пушнов А.С., Соколов А.С., Бутрин М.М. Методы интенсификации процесса тепло – и массообмена в колонных аппаратах с контактными устройствами //Известия МГТУ «МАМИ» 2013. – Т.4, №1(15). - С. 237-242.
- 28 Сокол Б.А., Чернышов А.К., Баранов Д.А., Беренгартер М.Г., Левин Б.В. Насадки массообменных колонн. – М.: ЗАО «ИНФОРХИМ», 2009. – 358 с.
- 29 Каган А.М., Чиж К.В., Тимонин А.С., Пушнов А.С. Сравнительные характеристики нерегулярных металлических насадок //Химическая промышленность, 2012. – Т.89, №1. - С.39-47.
- 30 Каган А.М., Чиж К.В., Пушнов А.С., Тимонин А.С., Юдина Л.А., Пальмов А.А. Аэродинамика миникольцевых насадок // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – №6 (68). – С. 42-45.
- 31 Беренгартер М.Г. и др. Процессы и аппараты защиты окружающей среды; насадочные скрубберы для контактного теплообмена: учебное пособие / . – СПб : ФГБОУВПО «СПГУТД», 2014. – 82 с.
- 32 Пушнов А., Витковская Р. Гидродинамика слоя насыпной насадки в форме колец Мёбиуса // Energetika. – 2013. – № 2 (59). - Р. 77-82.
- 33 Ясавеев, Х.Н. Модернизация установок переработки углеводородных смесей / Х.Н.Ясавеев, А.Г.Лаптев, М.И.Фарахов. -Казань: Казан.гос. энерг. ун-т, 2004, - 307 с.
- 34 Лаптев, А.Г. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике: пособие к расчету аппаратов / А.Г.Лаптев, М.И.Фарахов -Казань: Казан.гос. энерг. ун-т, 2008. - 730 с.
- 35 Дьяконов Г.С. Гидродинамические исследования нерегулярной насадки Инжехим-2002 // Тепломассообменные процессы и аппараты химической технологии: межвуз. темат. сб. науч. тр. - Казань, 2002. - С. 118-121.
- 36 Лаптев А.Г. Проектирование контактных элементов для массообменных насадочных колонн // Совершенствование подготовки учащихся и студентов в области графики, конструирования и стандартизации: межвуз. науч.-метод, сб. - Саратов, 1999. - С.115-118.
- 37 Зиберг Г.К. Результаты промышленных испытаний новых типов регулярных насадок / Г.К.Зиберг, В.В.Клюйко, Т.М.Феоктистова //Наука и техника в газовой пром.-ти.-2002.-№ 3.-С.16-19.
- 38 Семенов Д.Л., Фарахов М.И., Шигапов И.М., Маряхин Н.Н. Гидродинамические исследования нерегулярной насадки «Инжехим-2004» // Электронный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ». – 2004. – С. 1216-1221.
- 39 Плёночная тепло - и массообменная аппаратура (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) : Монография / [В.М. Олевский и др.]; Под ред. В.М. Олевского. - М.: Химия, 1988. – 240 с.

40 Насадки массообменных колонн: науч. изд. / под. ред. Д.А. Баранова. – М.: Инфохим, 2009. – 358 с.

41 Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов: Монография. Казань: Изд-во Казанского университета, 2007 – 500 с.

42 Павленко А.Н. Тепломассоперенос и разделение смесей при дистилляции в сложных канальных системах / Сборник докладов Всероссийской конференции XXXI «Сибирский теплофизический семинар». – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2014. – С. 16-28.

43 Лаптев А.Г. Определение эффективности очистки газов от дисперсной фазы и модернизация скрубберов высокоэффективными насадками / А.Г. Лаптев, Т.М. Фарахов, М.М. Башаров // Надежность и безопасность энергетики. – 2019. – №1. – С. 50-55.

44 Башаров М.М. Тепломассообменные и энергетические характеристики насадок колонных аппаратов / М.М. Башаров, Е.А. Лаптева // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2020. – Т.56. – №1. – С. 9-11.

45 Мисюля Д. И., Протасов С. К. Экспериментальные исследования регулярной насадки для массообменных аппаратов // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ, 2014. – №3. – С. 117 – 120.

46 Музафарова А. Р., Емельянычева Е. А. Классификация, основные требования и конструктивные особенности современных насадочных контактных устройств // Вестник технологического университета. – 2016. – Т.19, №2. – С. 63-67.

47 Васильев А.В., Бальчугов А.В. Разработка новой регулярной насадки с эффектом эжектирования для тепло- и массообменных процессов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 3 (31). – С. 135-139.

48 Пушнов А.С., Баранова Е.Ю., Соколов А.С. Результаты исследования гидродинамических характеристик регулярной насадки из соплообразных элементов // Известия МГТУ «МАМИ» 2013. – № 3(17), Т. 2. – С.99-105.

49 Klykov M.V., Alushkina T.V., Hasanov R.G. Modeling Fluid Distribution in Layers of Structured Packing with Triangular and Trapezoidal Corrugation // Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – Vol. 57. – P. 656–664.

50 Абдуллин А.З. Разработка конструкций и метод расчета струйных насадок для массообменных процессов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Абдуллин Ахияр Зарифович. – Уфа., 2003. – 20 с.

51 Фаткулин Р.Н. Разработка двутавровой насадки для массообменных процессов в системах газ-жидкость: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Фаткулин Раиль Наилевич. – М., 2004. – 24 с.

52 Ворошин А.В. Разделение бикомпонентной смеси в ректификационной установке непрерывного действия с пакетной вихревой насадкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. – Иваново, 2013. – 16 с.

53 Ворошин А.В., Чагин О.В., Блиничев В.П. Анализ конструктивного оформления ректификационных колонн // Химическая промышленность сегодня. – 2013. – № 9. – С. 23-28.

54 Неробелов А.О., Полянский А.В., Ворошин А.В. Разработка ректификационной колонны непрерывного действия с пакетной вихревой насадкой для получения этилового спирта // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология: материалы третьей Всероссийской научной конференции. – Казань: Издательство КНИТУ, 2012. – С. 42-44.

55 Повтарев И.А. Гидродинамика и массообмен в колонном аппарате с пакетной вихревой насадкой (на примере абсорбции углекислого газа раствором диэтаноламина): автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Повтарев Иван Александрович. – Иваново, 2013. – 16 с.

56 Рыжов С.О., Бальчугов А.В., Кузора И.Е. Гидродинамические исследования цепной насадки // Химическая промышленность сегодня. – 2013. – № 2. – С. 34-42.

57 Рыжов С.О. Интенсификация десорбции диоксида углерода из водных растворов на высокоэффективной регулярной насадке: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Рыжов Станислав Олегович. – М., 2013. – 21 с.

58 Балабеков О.С. Расчет и конструирование аппаратов с подвижной насадкой. – Алма-Ата, 1984. – 34 с.

59 А.с. 394059 СССР. Массообменный аппарат для очистки газ(пар) жидкость / Балтабаев Л.Ш. и др. Оpubл. 1980, Б.И.№34.

60 Серикулы Ж. Разработка и расчет тепломассообменных аппаратов с подвижной насадкой с учетом масштабного перехода: дис. ... доктора PhD. – Шымкент. 2015. -141 с.

61 Волненко А.А. Научные основы разработки и расчета вихревых массообменных и пылеулавливающих аппаратов: дис. ... докт. техн. наук. - Шымкент, 1999. – 300 с.

62 Кумисбеков С.А. Гидродинамика и массообмен в аппарате с регулярной пластинчатой вибрирующей насадкой: дис. ... канд. техн. наук. – Шымкент, 1999. – 261с.

63 Исмаилов Х.Б. Гидродинамика и массообмен в аппарате с регулярными вибрирующими спиральными насадками: дис. ... канд. техн. наук. Шымкент. 2006. - 140с.

64 А.с. 1678437 СССР, МКИ В 01 J 19/32. Аппарат с насадкой /Волненко А.А., Мустафина А.И., Серманизов С.С., Пахомов Б.С. Оpubл.23.09.91, Бюл. №35.

65 А.с. 1741884 СССР, МКИ В 01 J 19/32. Аппарат с насадкой /Волненко А.А., Мустафина А.И., Серманизов С.С., Жубаниязов Б.Т., Балабеков О.С., Пляцук Л.Д. Оpubл.23.06.92, Бюл. №23.

66 Предварительный патент РК 8045, МКИ В01D 19/32. Тепломассообменный аппарат /Есенов Т.С., Волненко А.А., Бекибаев Н.С., Серманизов С.С., Балабеков О.С., Сейтханов Н.Т. Оpubл. 15.10.1999, Бюл.№10. Оpubл. 24.11.2023, Бюл. №47.

67 Корганбаев Б.Н. Гидродинамика и тепло-массообмен в аппаратах с регулярно вращающимися насадками: дис. ... канд. техн. наук. – Шымкент, 1999. – 261с.

68 Раматуллаева Л.И. Гидродинамика и улавливание аэрозолей в аппарате с ударно-вихревым взаимодействием потоков: дис. ...канд. техн. наук. – Шымкент, 2009. – 113 с.

69 Волненко А.А., Сериков А., Корганбаев Б.Н., Абжапбаров А.А. Расчет газоочистных аппаратов с учетом вихревого взаимодействия и параметров движения насадочных элементов регулярной структуры // Сб. междунар. научн. и научно-технич. конф. «Механизация сельского хозяйства: наука и инновация». Ч.1 –Фергана. ФерПи, 2024.-С.293-298.

70 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.

71 Балтабаев Л.Ш., Тарат А.Я., Мухленов И.П. и др. Исследование некоторых гидродинамических характеристик и эффективности массообменного аппарата с колеблющейся насадкой // Химическая технология и силикаты. – Алма-Ата, 1974.-С.186-188.

72 Сабырханов Д.С. Разработка, расчет и внедрение массообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой: автореф. докт. техн. наук.– Шымкент, 1996- 30 с.

73 Бекибаев Н.С. Гидродинамика и массообмен в аппарате с регулярной подвижной пластинчатой насадкой: дис. ...канд. техн. наук.– Минск, 1987. – 246 с.

74 Горбунов В.А. Очистка газов фосфорных производств от пыли в комбинированных аппаратах с регулярной подвижной насадкой: автореф. дис. ... канд. наук.– Чимкент, 1991.-19 с.

75 Сейтханов Н.Т. Структура потоков и контактный тепломассообмен в аппарате с регулярной пластинчатой насадкой: дис....канд. техн. наук. – Шымкент, 2002. -107 с.

76 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 – 180 с.

77 Бекибаев Н.С. Научные основы сопряженных тепло- и массообменных процессов в синфазно-вихревых аппаратах: дис. ... докт. техн. наук. – Шымкент. 2008. – 240 с.

78 Корганбаев Б.Н. Интенсивные массообменные аппараты с комбинированным взаимодействием вихревых потоков /Монография под ред. д.т.н. Волненко А.А. - Шымкент: Южно-Казахстанский государственный университет им. М.О.Ауезова, 2001. – 98с.

79 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.

80 Перри Джон Г. Справочник инженера-химика. – Л.: Химия, Ленингр. отделение, 1969. – Т.1. – 639 с.

81 Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии //под ред. П.Г.Романкова. – Л.: Химия, 1981. – 560 с.

82 Кастальский А.А., Минц Д.М. Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения. – М.: Высшая школа, 1962. – 494 с.

83 Лурье Ю.Ю., Рыбников А.М. Химический анализ производственных сточных вод. – М.: Химия, 1974. – 336 с.

84 Кулов Н.Н. Гидродинамика и массообмен в нисходящих двухфазных пленочно-дисперсных потоках: автореф. дис. ... д-ра техн.наук.– М.,1984. – 45с.

85 Кулов Н.Н., Максимов В.В., Малюсов В.А., Жаворонков Н.М. Массоотдача в стекающих пленках жидкости // Теор. осн. хим. технол.- 1983. – Т.17. № 3.- С.291 – 302.

86 Кулов Н.Н., Малюсов В.А. Массоотдача в трубе с орошаемой стенкой при перемешивании пленки жидкости // Теор. осн. хим. технол. – 1967. – Т.1, – № 2. – С.273 – 283.

87 Холпанов Л.П. Гидродинамика и тепломассообмен при двухфазных пленочных и струйных течениях в контактных устройствах тепломассообменных аппаратов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1983. – 45с.

88 Холпанов Л.П., Малюсов В.А., Жаворонков Н.М. Исследование гидродинамики и массообмена при турбулентном течении пленки жидкости с уче-том входного участка // Теор. осн. хим. технол. – 1978. – Т.12, № 3. – С.438 – 442.

89 Холпанов Л.П., Ратнов А.Г., Малюсов В.А., Жаворонков Н.М. Расчет коэффициента массоотдачи в пленке жидкости, текущей по стенке с регулярной шероховатостью //Журнал прикл. хим. – 1980. – Т.53, № 7. – С.1557 – 1562.

90 А.А. Волненко, А. Сериков, А.А. Абжапбаров, А.Э. Левданский, Д.К. Жумадуллаев. Расчет порозности и эквивалентного диаметра насадки тепломассообменного аппарата с регулярной вращающейся насадкой //Механика и технологии /Научный журнал. – 2024. – №2(84). – С.289-298.

91 Alexander A.Volnenko, Baurzhan N. Korganbaev, Ablai Serikov, Alexander E. Levdansky, Dinmukhamed Kamalbek. Calculation of hydrodynamic characteristics and mass transfer parameters in an apparatus with a regularly rotating plate packing //Proceeding X International Conference «Industrial Technologies and Engineering» ICITE – 2023, Shymkent, Kazakhstan, November 18, 2023, V.II. – P.140-144.

92 A. A. Volnenko, A. Serikov, A. A. Abzhapbarov, D. K. Zhumadullayev, B. N. Korganbayev. Calculation of Motion Parameters and Hydrodynamic Characteristics of a Device Involving a Regular Rotating Packing //International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), Vol. 18, N. 6, 2024. – P. 274-282.

93 Baurzhan N. Korganbayev, Alexander A. Volnenko, Ablay S. Serikov, Madina R. Saitova. Calculation of the rotation frequency of plate nozzle elements with a vertical axis of rotation // Proceeding IX International Conference «Industrial

Technologies and Engineering» ICITE – 2022, Shymkent, Kazakhstan, December 9-10, 2022, V.II. – P.187-193.

94 А.А. Волненко, А. Сериков, А.А. Абжапбаров, А.Э. Левданский, Д.К. Жумадуллаев. Анализ влияния конструктивных параметров на энергозатраты в тепломассообменном аппарате с регулярной вращающейся насадкой //Механика и технологии /Химические технологии. Научный журнал. – 2024. – №3(85). – С.276-286.

95 Балабеков О.С, Гидродинамика, массообмен и пылеулавливание при противоточных и прямоточных двухфазных капельных и пленочных течениях в слое подвижной насадки: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1985. – 430с.

96 Серманизов С.С. Гидродинамика, массообмен и пылеулавливание при обтекании регулярно размещенных насадочных тел: Дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1990. – 319с.

97 Абжапбаров А.А. Гидродинамика, тепломассообмен и пылеулавливание в однозонных и двухзонных комбинированных газоочистных аппаратах: дис. ... доктора PhD. – Шымкент. 2023. -140 с.

98 Раматуллаева Л.И., Волненко А.А., Хусанов Ж.Е. Расчет гидродинамических характеристик аппарата с ударно-вихревым взаимодействием потока // М.Ауезов – гений нового времени. Тр. Межд. науч.-практ.конф. Т.10. - Шымкент, 2007-С.46-49.

99 А.А. Волненко, А. Сериков, А.А. Абжапбаров, А.Э. Левданский, Д.К. Жумадуллаев. Расчет структурных составляющих жидкой фазы в тепломассообменном аппарате с регулярной вращающейся насадкой //Механика и технологии // Научный журнал. – 2024. – №4(86). – С.258-269.

100 Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Новиков Б.В., Ягодкин В.И. Распыливание жидкостей. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.

101 Пажи Д.Г., Галустов В.С. Распылители жидкостей. – М.: Химия, 1979. – 216с.

102 Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.

103 Берд Р., Стюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. - М.: Химия, 1974.- 688с.

104 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.

105 Турбулентность. Принципы и применение / под ред. У. Фроста, Т.Моулдена. – М.: Мир, 1980. –535с.

106 Колмогоров А.Н. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости //Изв. АН СССР. Серия физическая. – 1942. – т.6, № 1-2. – С.56 – 58.

107 Колмогоров А.Н. Рассеяние энергии при локально-изотропной турбулентности //Докл. АН СССР. – 1941. – Т.32, № 1. – С.19 – 21.

108 Обухов А.М. О распределении энергии в спектре турбулентного потока //Докл. АН СССР. – 1941. – Т.32, № 1. – С.22 – 24.

- 109 Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача. – М.: Химия, 1982. – 696с.
- 110 Коган В.Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии. – Л.: Химия, 1977. – 592с.
- 111 Higbi R. Trans. Amer. Inst. Chem. Eng. – 1935, V.31, № 2. – P.365 –389.
- 112 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.
- 113 Авербух Т.Д., Павлов П.Г. Технология соединений хрома. – Л.: Химия, 1967. – 376 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

(19) KZ (13) В (11) 36475

(51) B01D 53/20 (2006.01)

B01D 47/14 (2006.01)

МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

К ПАТЕНТУ

(21) 2022/0603.1

(22) 06.10.2022

(45) 24.11.2023, бюл. №47

(72) Волненко Александр Анатольевич; Сериков Аблай Сериковулы; Камалбек Динмухаммед Куанышбекулы; Абжапбаров Абай Акилбекович; Сериковулы Жандос; Корманбаев Бауржан Ногайбаевич; Жумадуллаев Даулет Кошкарович

(73) Некоммерческое акционерное общество «Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова»

(56) KZ 10183 В 15.08.2006

RU 1500353 А1 15.08.1989

KZ 11173 А 15.02.2002

KZ 25541 А4 15.03.2012

(54) **АППАРАТ С НАСАДКОЙ ДЛЯ ТЕПЛОМАССОБМЕНА И ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ**

(57) Изобретение относится к теплообменному и пылеулавливающему оборудованию и может найти применение в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, пищевой, металлургической, горнодобывающей, целлюлозно-бумажной промышленности, преимущественно при осуществлении процессов теплообмена и пылеулавливания.

Задача изобретения - повышение эффективности аппарата за счет роста поверхности контакта фаз при распылении поступающей жидкости

вращающимися насадочными телами и позволяющей повысить удобство обслуживания и ремонта насадочных элементов и увеличить межремонтный срок работы.

Поставленная задача решается в аппарате с насадкой для теплообмена и пылеулавливания, содержащим корпус, штуцеры входа и выхода газа и жидкости, крепежные решетки и струны с прикрепленными к ним с шагом друг от друга вращающимися насадочными телами, снабженными вертикальными сетчатыми перегородками, в котором, согласно изобретению, оси вращения насадочных элементов располагаются в горизонтальной плоскости, снабжены втулками и ограничителями, а сами вращающиеся элементы выполнены трубчатыми и снабжены лопастями в виде прямоугольных пластин, расположенных под углом 10-60° к оси вращения и равномерно распределенных на внешней стороне трубчатых элементов.

В предлагаемой конструкции аппарата возможно достижение более высоких коэффициентов массотеплопередачи, констант скоростей химических реакций и уменьшение доли орошающей жидкости отбрасываемой на стенки аппарата; обеспечение удобства обслуживания и ремонта насадочных элементов; увеличение межремонтного срока работы насадочных элементов за счет создания оптимальных условий их эксплуатации.

(19) KZ (13) В (11) 36475

Изобретение относится к тепломассообменному и пылеулавливающему оборудованию и может найти применение в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, пищевой, металлургической, горнодобывающей, целлюлозно-бумажной промышленности, преимущественно при осуществлении процессов тепломассообмена и пылеулавливания.

Известен тепломассообменный аппарат [А.с. СССР №1098117 кл. В01D 53/20, 1982], содержащий корпус, штуцера входа и выхода газа и жидкости, опорно-распределительную решетку, гибкие струны с прикрепленными к ним призматическими насадочными телами, причем последние прикреплены к двум струнам с шагом, кратным 1,5-4 размерам миделевого сечения тела, что обеспечивает синфазный режим в вихреобразовании.

Достижение синфазного режима (одновременности в вихреобразовании), сочетающееся с колебательным движением гирлянд с насадочными элементами, позволяет совершить большую работу по дроблению поступающей жидкости на капли и тем самым повысить эффективность контактного устройства.

Недостатком известного аппарата является то, что способ крепления насадочных элементов к двум струнам ограничивает их движение. Возможны колебательные движения самих гирлянд с прикрепленными к ним насадочными элементами, однако частота их колебаний незначительна и не вносит существенного вклада в процесс интенсификации проводимых процессов.

Наиболее близким к предлагаемому изобретению является аппарат с насадкой [А.с. СССР №1741884, В01J 19/32, 1992], содержащий корпус, штуцеры входа и выхода газа и жидкости, крепежные решетки и струны с прикрепленными к ним с шагом друг от друга вращающимися насадочными телами, причем вращающиеся тела снабжены вертикальными сетчатыми перегородками.

Эффективность работы аппарата достигается за счет равномерности распределения жидкости в объеме рабочей зоны и роста поверхности контакта фаз при распылении поступающей жидкости вращающимися насадочными телами и соударении капель с пленкой жидкости стекающей по сетчатым перегородкам.

Недостатками известного аппарата является то, что использование вертикальных сетчатых перегородок усложняет конструкцию аппарата, затрудняет доступ к насадочным телам при проведении ремонта, приводит к увеличению материалоемкости, а значит и к стоимости изготовления.

В настоящем изобретении решается задача по разработке конструкции аппарата с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания, обеспечивающей повышение эффективности аппарата за счет роста поверхности контакта фаз при распылении поступающей жидкости вращающимися насадочными телами и позволяющей повысить удобство обслуживания и

ремонта насадочных элементов и увеличить межремонтный срок работы.

Технический результат при использовании предлагаемого изобретения заключается в достижении более высоких значений коэффициентов массотеплопередачи и степени пылеулавливания, повышении удобства обслуживания и ремонта, увеличении межремонтного срока работы.

Поставленная задача решается в аппарате с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания, содержащим корпус, штуцеры входа и выхода газа и жидкости, крепежные решетки и струны с прикрепленными к ним с шагом друг от друга вращающимися насадочными телами, снабженными вертикальными сетчатыми перегородками, в котором, согласно изобретению, оси вращения насадочных элементов располагаются в горизонтальной плоскости, снабжены втулками и ограничителями, а сами вращающиеся элементы выполнены трубчатыми и снабжены лопастями в виде прямоугольных пластин, расположенных под углом 10-60° к оси вращения и равномерно распределенных на внешней стороне трубчатых элементов.

На фиг.1 изображен общий вид аппарата с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания; на фиг.2 разрез А-А корпуса аппарата; на фиг.3 вращающийся насадочный элемент в разрезе; на фиг.4 вид А вращающегося насадочного элемента; на фиг.5 вращающийся насадочный элемент в аксонометрии.

Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания включает корпус 1, штуцеры 2 и 3, соответственно для ввода и вывода газа, ороситель 4 для ввода орошающей жидкости и штуцер 5 для ее слива, вращающиеся насадочные элементы 6, закрепленные на осях 7 с помощью ограничителей 8. Вращающиеся насадочные элементы включают втулку 9, трубчатый элемент 10 и лопасти 11.

Сопоставительный анализ заявляемого технического решения с прототипом показывает, что заявляемое устройство отличается от известного конструкцией насадочной зоны, в которой оси вращения насадочных элементов располагаются в горизонтальной плоскости, снабжены втулками и ограничителями, а сами вращающиеся элементы выполнены трубчатыми и снабжены лопастями в виде прямоугольных пластин, расположенных под углом 10-60° к оси вращения и равномерно распределенных на внешней стороне трубчатых элементов.

Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания работает следующим образом.

Газовый поток, поступающий на очистку, подается через штуцер 2, равномерно распределяется по сечению насадочной зоны корпуса 1. Насадочная зона состоит из вращающихся насадочных элементов 6 регулярно размещенных на осях 7 с фиксированными шагами расположения в радиальном и вертикальном направлениях. От смещения, вращающиеся насадочные элементы предохраняют ограничители 8. Насадочные

элементы включают втулку 9, трубчатый элемент 10 и лопасти 11.

Регулярное размещение насадочных элементов обеспечивает максимальное использование закономерностей взаимодействия вихрей, заключающееся в достижении режима одновременного вихреобразования (синфазного режима). В этом случае происходит суммирование мощности вихрей, образованных за насадочными телами от нижнего до верхнего насадочного слоя. Синфазный режим способствует значительной интенсификации проводимых процессов.

Кроме того, в насадочной зоне аппарата под действием динамического напора газового потока, воздействующего на лопасти, происходит вращение насадочных элементов. В результате этого жидкость, поступающая через оросителя 4, интенсивно дробится на мелкие капли, которые перемещаются по круговым траекториям от оси вращения в вертикальном направлении. Вихревое взаимодействие газожидкостного слоя и вращательное движение насадочных элементов способствует созданию высококачественной межфазной поверхности и достижению высокой эффективности процессов теплообмена.

Выполнение вращающейся насадки с горизонтальным расположением осей вращения позволяет исключить использование ограничительных сетчатых перегородок и значительно снизить долю отбрасываемой орошающей жидкости на стенки аппарата. Для изготовления втулок на осях вращающихся элементов, трубчатых элементов и лопастей могут быть использованы металлы, полимерные и пластмассовые материалы, а также полимерные (пластмассовые) материалы могут быть нанесены на соприкасающиеся поверхности пары: металлические втулки – трубчатые элементы. В результате этого достигается значительное снижение коэффициентов трения, а, следовательно, и износа трущихся поверхностей.

Выполнение трубчатых элементов, снабженных лопастями в виде прямоугольных пластин, расположенных под углом 10-60° к оси вращения и равномерно распределенных на внешней стороне трубчатых элементов позволяет достигать значительных окружных скоростей вращения

насадочных элементов. Это способствует дроблению поступающей жидкости на мелкие капли, созданию высококачественной межфазной поверхности и достижению высокой эффективности проводимых процессов. Изготовление вращающихся насадочных элементов с углами расположения лопастей менее 10° и более 60° приводит к снижению числа оборотов насадочных элементов и ухудшению показателей эффективности.

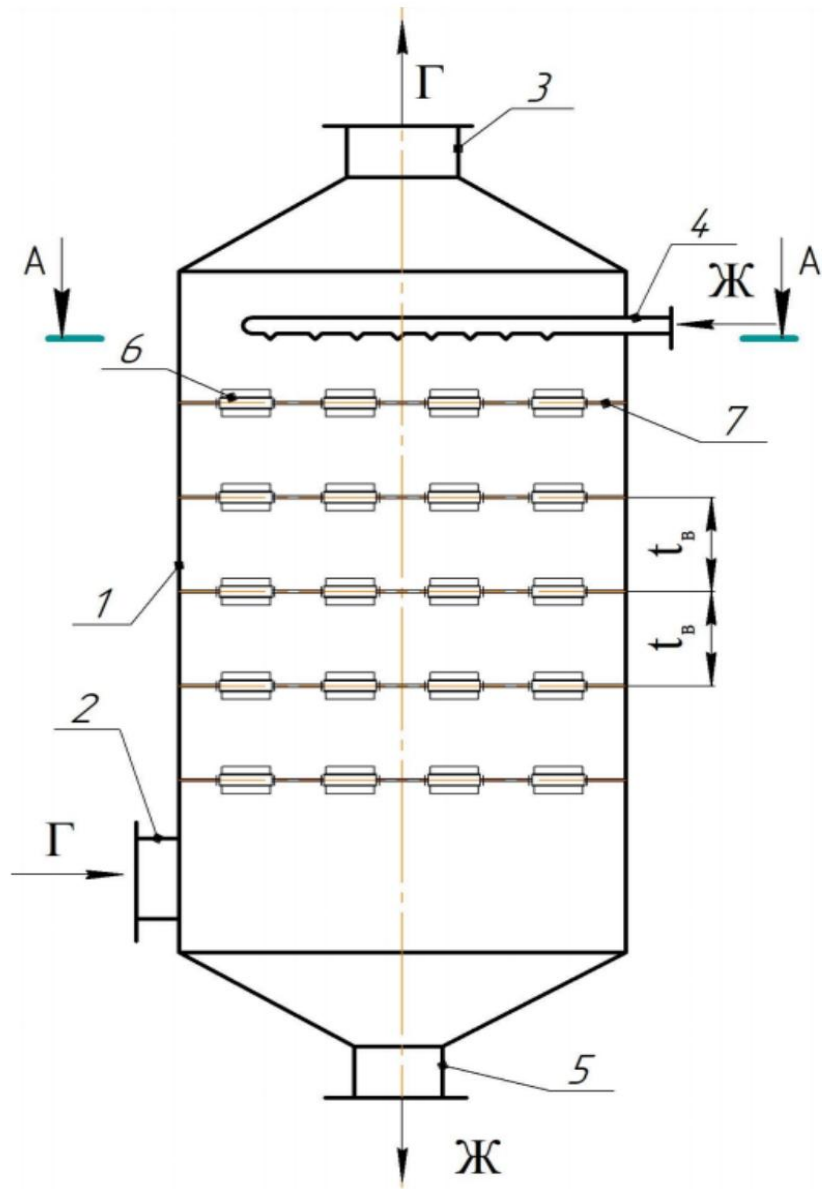
Очищенный газовый поток выводится из аппарата через штуцер 3, а отработанная жидкость (абсорбент) выводится через штуцер 5.

Преимуществами предложенного технического решения по сравнению с прототипом являются:

- достижение более высоких количественных и качественных показателей межфазной поверхности, коэффициентов теплопередачи, констант скоростей химических реакций за счет равномерного распределения газовой и жидкой фаз в объеме вращающейся насадки с горизонтальным расположением осей вращения и уменьшения доли орошающей жидкости отбрасываемой на стенки аппарата;
- обеспечение удобства обслуживания и ремонта насадочных элементов;
- увеличение межремонтного срока работы насадочных элементов за счет создания оптимальных условий их эксплуатации.

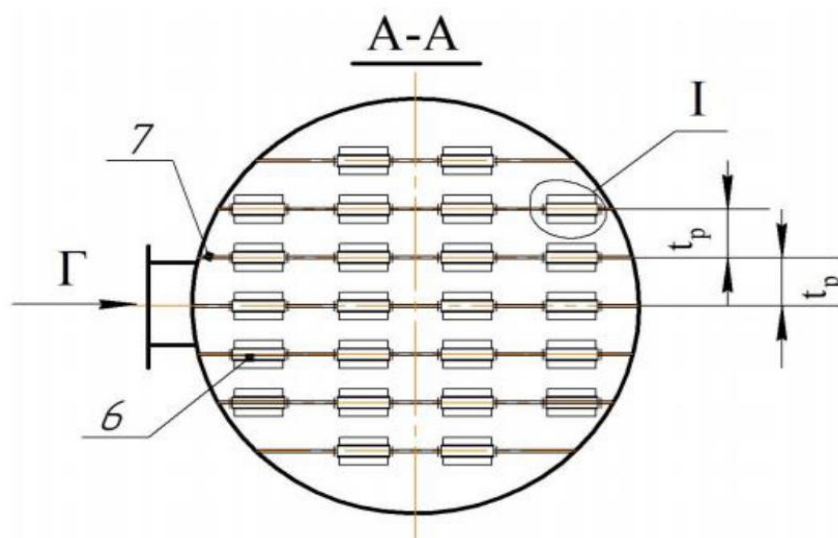
ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания содержащий корпус, штуцеры входа и выхода газа и жидкости, крепежные решетки и струны с прикрепленными к ним с шагом друг от друга вращающимися насадочными телами, снабженными вертикальными сетчатыми перегородками, *отличающийся* тем, что оси вращения насадочных элементов располагаются в горизонтальной плоскости, снабжены втулками и ограничителями, а сами вращающиеся элементы выполнены трубчатыми и снабжены лопастями в виде прямоугольных пластин, расположенных под углом 10-60° к оси вращения и равномерно распределенных на внешней стороне трубчатых элементов.

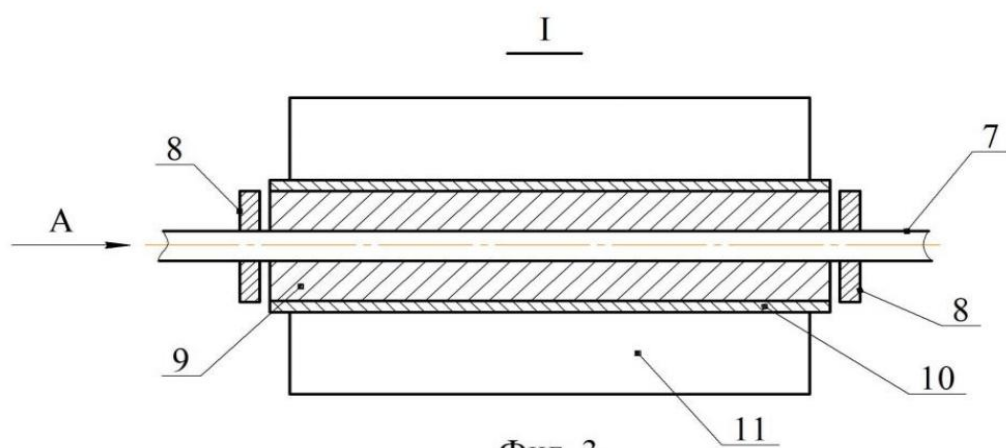


Фиг. 1

Рисунок А.1 – Общий вид аппарата с насадкой



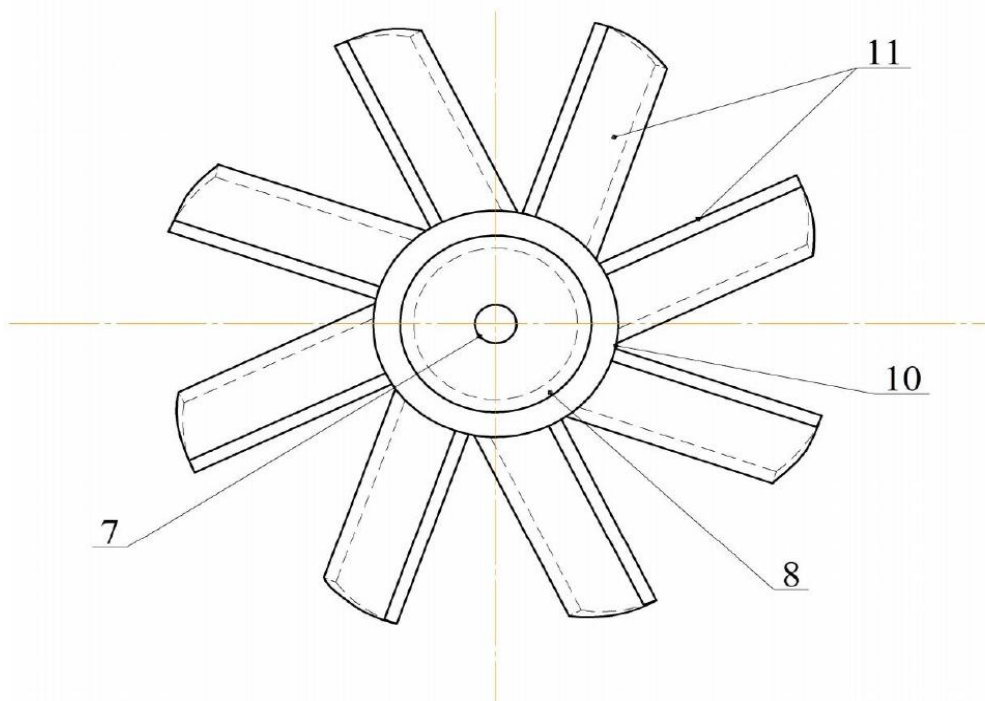
Фиг. 2



Фиг. 3

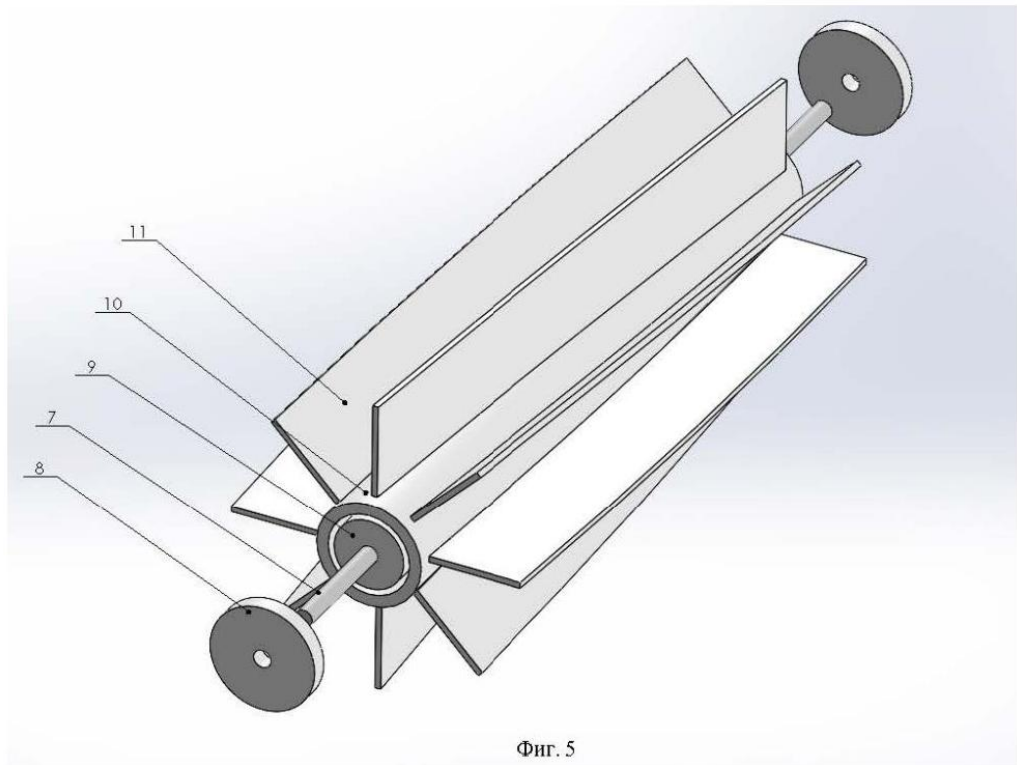
Рисунок А.2 – Разрез А–А корпуса аппарата и вращающегося насадочного элемента

Вид А



Фиг. 4

Рисунок А.3 – Вид А вращающегося насадочного элемента



Фиг. 5

Верстка Д. Женьсова
Корректор Г. Косанова

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

(19) KZ (13) В (11) 37094

(51) B01D 53/20 (2006.01)

B01D 47/14 (2006.01)

МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

К ПАТЕНТУ

(21) 2023/0783.1

(22) 19.11.2023

(45) 20.12.2024, бюл. №51

(72) Волненко Александр Анатольевич; Сериков Аблай Серикұлы; Кумисбеков Серик Аргинбаевич; Абжапбаров Абай Ақилбекович; Корганбаев Бауржан Ногайбаевич

(73) Некоммерческое акционерное общество «Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова»

(56) KZ 8045 А, 15.10.1999

KZ 10183 В, 15.08.2006

SU 1187855 А1, 30.10.1985

(54) **АППАРАТ С НАСАДКОЙ ДЛЯ ТЕПЛОМАССОБМЕНА И ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ**

(57) Изобретение относится к теплообменному и пылеулавливающему оборудованию и может найти применение в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, пищевой, металлургической, горнодобывающей, целлюлозно-бумажной промышленности, преимущественно при осуществлении процессов теплообмена и пылеулавливания.

Задача изобретения – повышение эффективности аппарата за счет достижения режима одновременного вихреобразования (синфазного режима), снижения количества капель жидкости, отбрасываемых к стенкам аппарата и вовлечение их

в проводимые процессы, а также увеличение межремонтного срока работы.

Поставленная задача решается в аппарате с насадкой для теплообмена и пылеулавливания, содержащим корпус, штуцеры входа и выхода газа и жидкости, крепежные решетки с закрепленными на них струнами, снабженными равномерно размещенными на них вращающимися насадочными элементами, выполненными в виде втулок с равномерно закрепленными на их наружной поверхности в один или два ряда при помощи спиц пластинами, в котором, согласно изобретению, прямоугольные пластины, образующие лопасти, расположенные под углом к набегающему потоку крепятся непосредственно к трубчатому элементу, а их свободные концы прикреплены к кольцевому ободу, при этом отношение ширины лопасти к диаметру трубчатого элемента составляет 1-2,5, а отношение ширины лопасти к высоте кольцевого обода 0,7-1.

В предлагаемой конструкции аппарата возможно достижение более высоких коэффициентов массотеплопередачи и степени пылеулавливания, констант скоростей химических реакций и уменьшение доли орошающей жидкости отбрасываемой на стенки аппарата; увеличение межремонтного срока работы насадочных элементов за счет использования пары трубчатый элемент – втулка.

(19) KZ (13) В (11) 37094

Изобретение относится к теплообменному и пылеулавливающему оборудованию и может найти применение в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, пищевой, металлургической, горнодобывающей, целлюлозно-бумажной промышленности, преимущественно при осуществлении процессов теплообмена и пылеулавливания.

Известен аппарат с насадкой [А.с. СССР №1678437 кл. В01J 19/32, 1991] содержащий корпус, штуцеры входа и выхода газа и жидкости, крепежную решетку и струны с прикрепленными к ним с шагом друг от друга вращающимися насадочными телами, выполненными в виде прямоугольных пластин, имеющих надрезы, равноотстоящие от центра вращения и образующие сектора, повернутые относительно плоскости пластины на угол 30-150°.

Эффективная работа аппарата при скоростях газового потока от 3 м/с и выше достигается за счет роста поверхности контакта фаз при увеличении количества дробящихся капель и равномерности их распределения в объеме рабочей зоны.

Недостатком известного аппарата является то, что срывающиеся с концов вращающихся пластин капли жидкости, не имеют ограничений в своем полете. И если часть капель жидкости с соседних вращающихся элементов в центральной части аппарата соударяются между собой, то периферийные насадочные элементы отбрасывают капли жидкости на стенки аппарата и в дальнейшем эта жидкость практически не участвует в проводимых процессах. В результате этого эффективность устройства снижается.

Наиболее близким к предлагаемому изобретению является теплообменный аппарат [Предварительный патент РК №8045, МКИ В01D 53/20, Опубл. 15.10.99., Бюл. №10], содержащий корпус, штуцеры входа и выхода газа и жидкости, крепежные решетки с закрепленными на них струнами, снабженными равномерно размещенными на них вращающимися насадочными элементами, выполненными в виде втулок с равномерно закрепленными на их наружной поверхности в один или два ряда при помощи спиц пластинами.

Эффективность работы аппарата достигается за счет равномерности распределения жидкости в объеме рабочей зоны и роста поверхности контакта фаз при распылении поступающей жидкости вращающимися насадочными элементами.

Недостатками известного аппарата является то, что крепление пластинчатых лопастей на спицах значительно увеличивает размеры насадочных элементов. Известно, что в аппаратах с регулярным расположением насадочных элементов максимальная эффективность проводимых процессов достигается в режимах одновременного вихреобразования (синфазных режимах), зависящих от фиксированных шагов между насадочными элементами в вертикальном направлении. Увеличенные размеры насадочных элементов за счет крепления их к спицам без соблюдения фиксированных шагов приводит к невозможности

обеспечения синфазного режима, что приведет к снижению эффективности аппарата. В случае, если будут соблюдены фиксированные шаги, то общая высота рабочей зоны значительно увеличивается, что сопряжено с ростом материалоемкости аппарата. Зазор между втулкой и лопастями на длине спиц не способствует стабильности вихревого взаимодействия потоков в синфазном режиме. Это также приводит к снижению эффективности проводимых процессов.

Кроме того, располагающиеся у стенок аппарата насадочные элементы при своем вращении отбрасывают капельную жидкость на стенки, которая стекает в виде пленки и практически не участвует в проводимых процессах, в результате чего эффективность устройства снижается.

В настоящем изобретении решается задача по разработке конструкции аппарата с насадкой для теплообмена и пылеулавливания, обеспечивающей повышение его эффективности за счет достижения режима одновременного вихреобразования (синфазного режима), снижения количества капель жидкости, отбрасываемых к стенкам аппарата и вовлечение их в проводимые процессы, а также увеличение межремонтного срока работы.

Технический результат при использовании предлагаемого изобретения заключается в достижении более высоких значений коэффициентов массотеплопередачи и степени пылеулавливания, обеспечении стабильности работы вращающихся насадочных элементов и увеличении межремонтного срока работы насадочных элементов за счет использования пары трубчатый элемент – втулка.

Поставленная задача решается в аппарате с насадкой для теплообмена и пылеулавливания, содержащим корпус, штуцеры входа и выхода газа и жидкости, крепежные решетки с закрепленными на них струнами, снабженными равномерно размещенными на них вращающимися насадочными элементами, выполненными в виде втулок с равномерно закрепленными на их наружной поверхности в один или два ряда при помощи спиц пластинами, в котором, согласно изобретению, прямоугольные пластины, образующие лопасти, расположенные под углом к набегающему потоку крепятся непосредственно к трубчатому элементу, а их свободные концы прикреплены к кольцевому ободу, при этом отношение ширины лопасти к диаметру трубчатого элемента составляет 1-2,5, а отношение ширины лопасти к высоте кольцевого обода 0,7-1.

На фиг.1 изображен общий вид аппарата с насадкой для теплообмена и пылеулавливания; на фиг.2 разрез А-А корпуса аппарата; на фиг.3 фрагмент вращающейся насадки в разрезе с одним лопастным завихрителем; на фиг.4 фрагмент вращающейся насадки в разрезе с двумя лопастными завихрителями; на фиг.5 вид А вращающейся насадки; на фиг.6 вращающийся насадочный элемент в аксонометрии.

Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания включает корпус 1, штуцеры 2 и 3, соответственно для ввода и вывода газа, ороситель 4 для ввода орошающей жидкости и штуцер 5 для ее слива, крепежные решетки 6, оси 7 с закрепленными на них вращающимися насадками 8, включающими втулку 9, трубчатый элемент 10, наклонные прямоугольные лопасти 11, кольцевой обод 12 и ограничитель 13.

Сопоставительный анализ заявляемого технического решения с прототипом показывает, что заявляемое устройство отличается от известного наличием трубчатого элемента, на наружной поверхности которого непосредственно закрепляются прямоугольные пластины, образующие лопасти, расположенные под углом к набегающему потоку, а их свободные концы прикреплены к кольцевому ободу.

Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания работает следующим образом.

Газовый поток, поступающий на очистку, подается через штуцер 2, равномерно распределяется по сечению насадочной зоны корпуса 1. Насадочная зона представляет собой вращающуюся насадку 8 размещенную на осях 7. В вертикальном направлении оси 7 вращающейся насадки 8 с фиксированными шагами крепятся к верхней и нижней крепежным решеткам 6. Вращающаяся насадка 8 включает втулку 9, трубчатый элемент 10, наклонные прямоугольные лопасти 11 и кольцевой обод 12. От смещения вращающейся насадки 8 в вертикальном направлении служат ограничители 13, имеющие жесткое крепление с осью 7. Применение трубчатых элементов обусловлено увеличением долговечности работы пары трубчатый элемент – втулка по сравнению с парой втулка – ось.

При движении газового потока в объеме насадочной зоны из-за воздействия динамического напора газа на прямоугольные пластины, образующие лопасти, расположенные под углом к набегающему потоку насадочные элементы, приводятся во вращательное движение. Над насадочной зоной располагается ороситель 4. Поступающая через него орошающая жидкость попадает на вращающуюся насадку и дробится на мелкие капли. Непосредственно в зонах вращения на наклонных пластинах 11 жидкость под действием центробежной силы стремится к периферии. Для ограничения движения пленки жидкости в горизонтальном направлении и полета капель жидкости в радиальном направлении установлены кольцевые ободы 12. Достигнув обода, пленка жидкости изменяет свое движение на вертикальное, и срыв капель осуществляется в вертикальном направлении по крутовым траекториям. Предложенное техническое решение по установке ободов позволяет в значительной степени исключить отбрасывание капель жидкости на стенки аппарата и тем самым обеспечить максимальное участие поступающей жидкости в процессах тепломассообмена или пылеулавливания.

Установка на трубчатом элементе двух лопастных завихрителей (фиг.4) способствует созданию устойчивого вращательного движения за счет более полного использования динамического напора газа.

Интенсивное дробление жидкости на мелкие капли вращающейся насадкой способствует росту поверхности контакта фаз, а, следовательно, и эффективности аппарата. Кроме того, регулярное расположение вращающихся элементов с фиксированными шагами в вертикальном направлении приводит к достижению режима одновременного вихреобразования (синфазного режима), при котором происходит суммирование мощности формирующихся вихрей и, как следствие, значительная интенсификация проводимых процессов.

Очищенный газовый поток выводится из аппарата через штуцер 3, а отработанная жидкость сливается через штуцер 5.

Выполнение вращающихся насадочных элементов с отношением ширины лопасти к диаметру трубчатого элемента равном 1, обеспечивают их устойчивое вращение, при этом порозность насадочного слоя в сечении аппарата имеет минимальные значения. В результате этого показатели гидравлического сопротивления невысоки. С увеличением численных значений отношения ширины лопасти к диаметру трубчатого элемента вплоть до 2,5 порозность слоя вращающихся насадочных элементов снижается, а гидравлическое сопротивление несколько возрастает. Однако в этом случае увеличение ширины лопастей способствуют более полному использованию энергии динамического напора газа и, как следствие, интенсивному дроблению пленок и капель, созданию высокой межфазной поверхности и росту эффективности проводимых процессов.

Соблюдение отношения ширины лопасти к высоте кольцевого обода в пределах 0,7-1 с одновременным уменьшением ширины лопастей и высоты кольцевого обода позволяет обеспечить высоту порога, образуемого концом наклонной лопасти и кольцевым ободом в пределах 5-7 мм. Это способствует тому, что движущаяся по лопасти пленка жидкости вынуждена изменять направление своего движения с горизонтального на вертикальное и произвести дробление жидкости на кромке кольцевого обода по круговым траекториям. Данный вид разбрызгивания позволяет предотвратить отбрасывание жидкости к стенкам аппарата и обеспечить ее эффективное использование в объеме контактной зоны.

Преимуществами предложенного технического решения по сравнению с прототипом являются:

- достижение более высоких количественных и качественных показателей межфазной поверхности, коэффициентов массотеплопередачи и степени пылеулавливания, констант скоростей химических реакций за счет достижения синфазного режима взаимодействия потоков газа и жидкости и уменьшения доли орошающей жидкости, отбрасываемой на стенки аппарата;

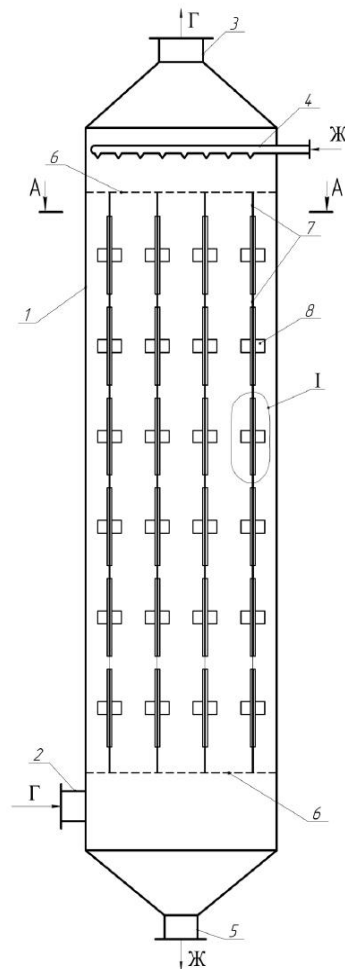
- увеличение межремонтного срока работы насадочных элементов за счет использования пары трубчатый элемент – втулка.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания, содержащий корпус, штуцеры входа и выхода газа и жидкости, крепежные решетки с закрепленными на них струнами, снабженными равномерно размещенными на них вращающимися насадочными элементами,

выполненными в виде втулок с равномерно закрепленными на их наружной поверхности в один или два ряда при помощи спиц пластинами отличающийся тем, что прямоугольные пластины, образующие лопасти, расположенные под углом к набегающему потоку крепятся непосредственно к трубчатому элементу, а их свободные концы прикреплены к кольцевому ободу.

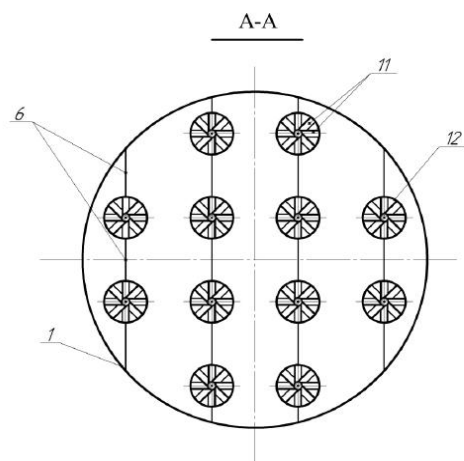
2. Аппарат с насадкой по п.1, отличающийся тем, что отношение ширины лопасти к диаметру трубчатого элемента составляет 1-2,5, а отношение ширины лопасти к высоте кольцевого обода 0,7-1.



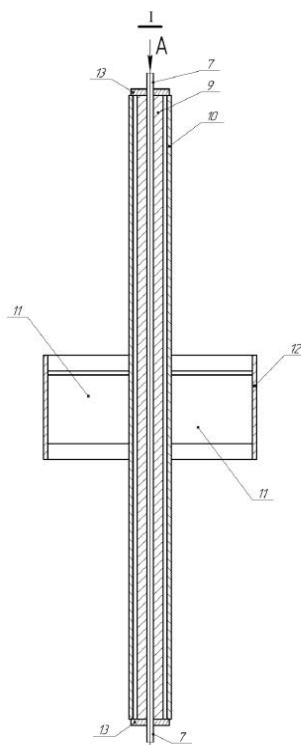
Фиг. 1

Рисунок Б.1 – Общий вид аппарата с насадкой

37094



Фиг. 2

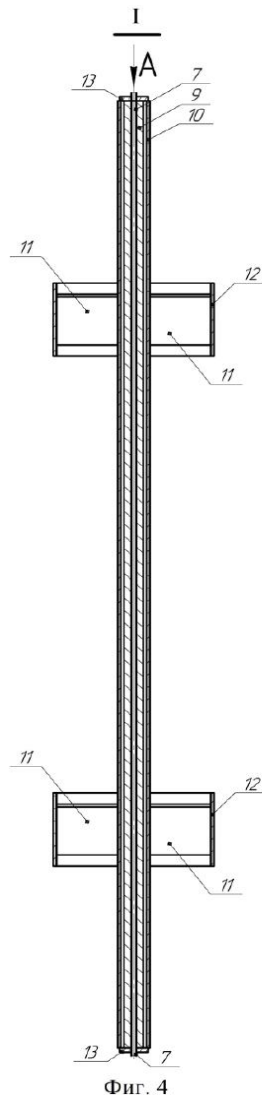


Фиг. 3

5

Рисунок Б.2 – Разрез А-А корпуса аппарата и фрагмент вращающейся насадки в разрезе с одним лопастным завихрителем

37094

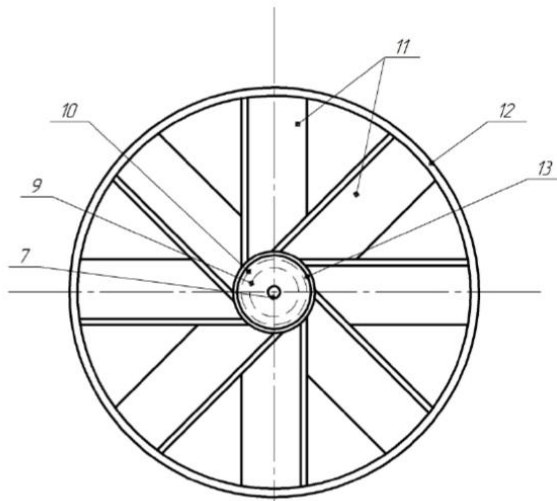


6

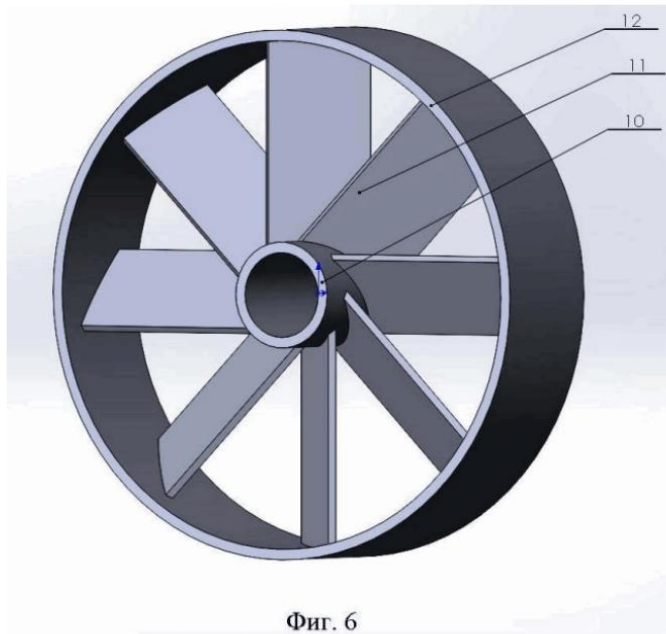
Рисунок Б.3 – Фрагмент вращающейся насадки в разрезе с двумя лопастными завихрителями

37094

Вид А



Фиг. 5



Фиг. 6

Верстка Д. Женьсова
Корректор Г. Косанова

7

Рисунок Б.4 – Вид А вращающейся насадки и насадочный элемент в аксонометрии

ПРИЛОЖЕНИЕ В

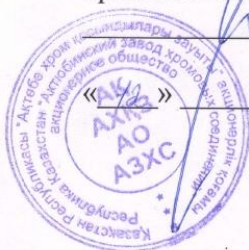
Рекомендации по проектированию и методика расчета

«СОГЛАСОВАНО»

Председатель правления
АО «Актюбинский завод
хромовых соединений»

Химич А.А.

2024г.



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по НР и И
ЮКУ им. М. Ауэзова

Сулейменов У.С.

« 1 »

2024г.



РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОМАССОБМЕННОГО АППАРАТА С РЕГУЛЯРНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ НАСАДКОЙ

Руководитель темы,
научный консультант
д.т.н., профессор

А.А.Волненко

А.А.Волненко

Исполнители:
М.н.с.

Д.К. Камалбек

Д.К. Камалбек

Докторант

А. Сериков

А. Сериков

Республика Казахстан
г. Шымкент, 2024

Рекомендации по проектированию и эксплуатации промышленных аппаратов

На основании полученных результатов исследований нами разработаны рекомендации по проектированию и эксплуатации газоочистных аппаратов.

Скорость газа w_2 . По результатам исследований установлен наиболее оптимальный - капельный режим, которому соответствует диапазон скоростей $w_2=3,5-4,5$ м/с. В этом режиме достигается наибольшая турбулизация потоков газа и жидкости при допустимом брызгоуносе [1-5].

Плотность орошения при проведении процессов абсорбции, контактного теплообмена и пылеулавливания определяют на основе материального баланса, растворимости газа и концентрации улавливаемых компонентов в газе и жидкости. Рекомендуемая плотность орошения для хорошо растворимых газов составляет $L=15-25$ м³/м²·ч, для плохо растворимых газов $L=50$ м³/м²·ч и выше. Необходимо отметить, что аппараты с регулярной подвижной насадкой также хорошо зарекомендовали себя при плотностях орошения $L=100$ м³/м²·ч и выше[6].

Основные конструктивные характеристики насадки. Рекомендуемая конструкция вращающихся насадочных элементов с прямоугольными лопастями (ВПЛ) аналогична той, которая была исследована в лабораторных условиях (рисунок В.1).

Основная характеристика вращающейся насадки - диаметр обода $d_{об}$. В зависимости от диаметра проектируемого аппарата диаметр обода составляет $d_{об}=50$ и 100 мм.

Рекомендуемые размеры составляющих вращающейся насадки ВПЛ в зависимости от диаметра обода $d_{об}$:

Высота обода - $h_{об}=0,5d_{об}$;

Толщина обода - $\delta_{об}=0,02d_{об}$;

Длина лопастей - $l_{л}=0,38d_{об}$;

Ширина лопастей - $b_{л}=0,5d_{об}$;

Толщина лопастей - $\delta_{л}=0,02d_{об}$;

Угол наклона лопастей $\alpha=45^0$;

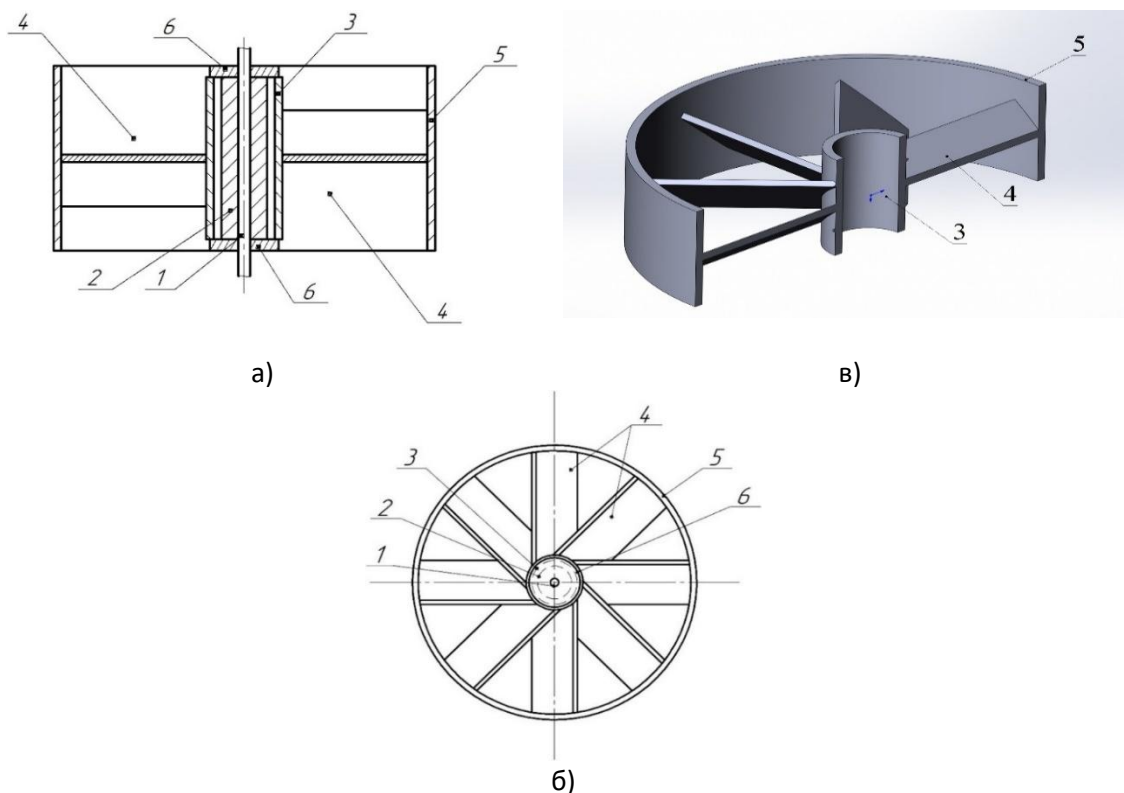
Диаметр трубчатого элемента - $d_{тр}=0,2d_{об}$;

Внешний диаметр втулки - $d_{втул}=0,18d_{об}$;

Диаметр оси - $d_{ос}=0,04d_{об}$;

Внешний диаметр ограничителя - $d_{огр}=0,2d_{об}$.

Шаг расположения насадочных элементов в вертикальном t_v и радиальном t_r направлениях. Оптимальным шагом расположения вращающихся насадочных элементов в вертикальном направлении при котором достигается режим одновременного вихреобразования (синфазный режим) является $t_v=3,5d_{об}$.



а) – общий вид насадочного элемента; б) – вид сверху; в) – разрез насадочного элемента в аксонометрии. 1 - ось; 2 - втулка; 3 – трубчатый элемент; 4 - наклонные прямоугольные лопасти; 5 - кольцевой обод; 6 - ограничители.

Рисунок В.1- Вращающаяся насадка ВПЛ

Оптимальным шагом в радиальном направлении является $t_p = 2d_{об}$.

Материал для изготовления насадочных элементов и струн выбирается, исходя из физико-химических свойств обрабатываемых сред.

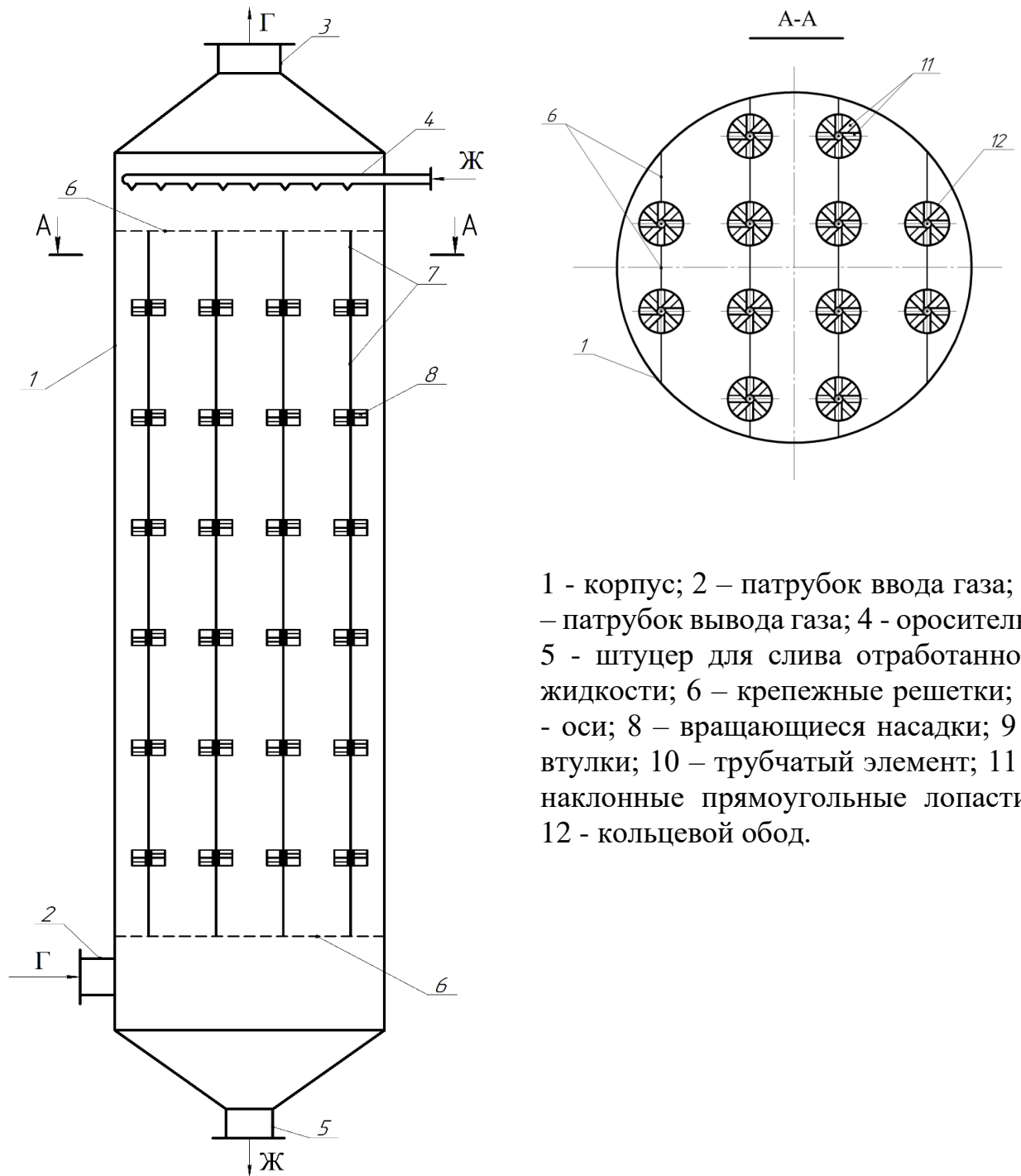
Высота и количество секций насадочной зоны. Минимальная высота насадочной зоны составляет 1 м. Если при заданных исходных данных высота секции в 1 м не обеспечивает заданную эффективность, то рассматривают два варианта: при расчете увеличивают высоту секции до 1,5 или 2 м, или же рассчитывают две секции с разрывом (не менее 0,5 м) высотой по 1 м.

Оросительные устройства. В аппаратах с регулярно размещенной 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 [1-5].

Каплеуловитель. Он устанавливается в тех случаях, когда рабочая скорость газа в аппарате превышает 4,5 м/с [7]. Конструкция каплеуловителя подбирается исходя из количества жидкости, уносимой из аппарата и ограничений по гидравлическому сопротивлению. Выбор осуществляется по справочной литературе [8-10].

Методика расчета аппарата с вращающейся насадкой

На рисунке В.2 представлена конструкция аппарата с вращающейся насадкой.



- 1 - корпус; 2 – патрубок ввода газа; 3 – патрубок вывода газа; 4 - ороситель; 5 - штуцер для слива отработанной жидкости; 6 – крепежные решетки; 7 - оси; 8 – вращающиеся насадки; 9 - втулки; 10 – трубчатый элемент; 11 - наклонные прямоугольные лопасти; 12 - кольцевой обод.

Рисунок В.2 – Аппарат с вращающейся насадкой

Первоочередной задачей перед выполнением технологических и конструктивно-механических расчетов проектируемого аппарата является

определение его **внутреннего диаметра**. Он определяется на основании данных расхода газа из технологического регламента или при проведении обследования технологической схемы конкретного производства по формуле:

$$D_{\text{ап}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\Gamma}}{\pi \cdot w_{\Gamma}}} \quad (1)$$

Здесь Q_{Γ} – расход газового потока, м³/ч; w_{Γ} – оптимальная скорость газа, м/с.

Гидродинамические характеристики

Гидравлическое сопротивление рассчитывается по формуле:

$$\Delta P_L = \xi_L \cdot \frac{H}{d_{\text{экв}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma} W_{\Gamma}^2}{2 \varepsilon_0^2} \quad (2)$$

Здесь коэффициент сопротивления определяется по уравнению:

$$\xi_L = 0,212 \cdot \theta_{\text{в}} \cdot \theta_{\text{р}} \cdot \sqrt{\frac{\text{Re}_{\text{г}} \cdot \text{Re}_{\text{ж}}}{\text{Re}_{\Gamma}}} \quad (3)$$

где $\theta_{\text{в}}$ - коэффициент, определяющий степень взаимодействия вихрей в вертикальном направлении; $\theta_{\text{р}}$ - коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в радиальном направлении [7].

Модифицированное число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{ц}} = \frac{n_s \cdot d_{\text{об}}^2}{\nu_{\Gamma}} \quad (4)$$

Здесь $n_s = \frac{\omega_{\text{еп}}}{2 \cdot \pi}$ - число оборотов насадочных элементов, с⁻¹.

Частота вращения насадочных элементов:

$$\omega_{\text{еп}} = \frac{1,7}{\varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{(\rho_{\Gamma} \cdot W_{\Gamma}^2 - \rho_{\text{ж}} W_{\text{ж}}^2) \cdot S \cdot \sin \alpha \cdot K}{2mR + \rho_{\Gamma} R^2 \cdot S \cdot \sin \alpha \cdot \text{tg} \alpha}} \quad (5)$$

Число Рейнольдса по газовой фазе, которое определяется по формуле:

$$\text{Re}_{\Gamma} = \frac{W_{\Gamma} \cdot d_{\text{экв}}}{\nu_{\Gamma}} \quad (6)$$

Число Рейнольдса по жидкой фазе $\text{Re}_{\text{ж}}$ определим по формуле:

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{U_{\text{ж}} \cdot d_{\text{экв}}}{\nu_{\text{ж}}}, \quad (7)$$

где $U_{\text{ж}} = L/3600$ - скорость жидкости, м/с.

Количество жидкости, удерживаемой в аппарате

$$h_o = 0,476 \cdot \xi_L \cdot \frac{H}{d_{\text{экв}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma} W_{\Gamma}^2}{2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot \varepsilon_0^2} \quad (8)$$

Газосодержание слоя

$$\varphi = \varepsilon - \frac{h_o}{H} \quad (9)$$

Структурные составляющие жидкой фазы

Толщина пленки жидкости на ободу вращающегося элемента:

$$\delta_{\text{пл}}^{\text{об}} = \left(\frac{3 \cdot \nu_{\text{ж}} \cdot U_{\text{ж}} \cdot B_s}{2 \cdot \omega_{\text{вр}}^2 \cdot \sin \alpha} \right)^{1/3} \quad (10)$$

Здесь $B_s = S_{\text{об}} / S_{\text{лоп}}$ - отношение площади поверхности обода к площади поверхности допастей.

Скорость струи жидкости:

$$U_{\text{стр}} = 1,01 \cdot \left(\frac{\sigma^{1,143} \cdot \omega_{\text{вр}}^{0,572}}{\left(\frac{d_{\text{об}}}{2} \right)^{0,571} \cdot U_{\text{ж}}^{0,858} \cdot \rho_{\text{ж}}^{0,143} \cdot \rho_{\Gamma}} \right)^{0,5} \quad (11)$$

Диаметр струи жидкости:

$$d_{\text{стр}} = 1,6 \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_{\text{ж}} \cdot \left(\frac{d_{\text{об}}}{2} \right) \cdot \omega_{\text{вр}}^2} \right)^{0,5} \quad (12)$$

Диаметр капель жидкости:

$$d_k = 0,925 \cdot \xi_L^{1/3} \cdot \frac{\rho_{\text{ж}}^{1/6} \cdot d_{\text{стр}}^{2/3} \cdot \sigma^{1/3} \cdot U_{\Gamma}}{U_{\text{стр}}^{5/3} \cdot \rho_{\Gamma}^{1,2}} \quad (13)$$

Массообменные характеристики:

Коэффициент массоотдачи в газовой фазе

$$\beta_{гс} = 2,25 \cdot \left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/2} \cdot \xi_L \cdot \frac{U_{\kappa}^{1/2} \cdot \nu_{\kappa}^{5/6} \cdot \Phi^2}{d_{\kappa}^{1/2} \cdot D_{\Gamma}^{1/3}} \quad (14)$$

Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе

$$\beta_{жс} = 30,94 \cdot \left[\frac{(1-\varphi)}{\varphi} \right]^{(1/4)} \cdot \left[\xi_L \cdot \frac{(1-\varepsilon_0)}{(1-\varphi_{яч})} \cdot \frac{K_{\rho} \cdot D_{жс}^2 \cdot U_{\Gamma}^3}{t_{\theta} \cdot \nu_{жс}} \right]^{1/4} \quad (15)$$

Расчет показателей абсорбции

При реальных значениях концентрации улавливаемого вещества коэффициент абсорбции, отнесенный к поперечному сечению аппарата, может быть рассчитан по уравнению:

$$K_{гс} = \frac{q_a}{\Delta y_{ср}}, \quad (16)$$

где q_a - скорость абсорбции, кг/(м²с); $\Delta y_{ср}$ - движущая сила процесса, кг/м³.

Движущая сила процесса [11]:

$$\Delta y_{ср} = \frac{(y_H - y_K)}{\ln \frac{y_H}{y_K}} \quad (17)$$

Число единиц переноса по газовой фазе:

$$N_{ог} = \ln \frac{y_H}{y_K} \quad (18)$$

Скорость абсорбции рассчитывается по формуле:

$$q_a = \frac{G_{\Gamma}}{\tau_a \cdot S_{ап}}. \quad (19)$$

Здесь G_{Γ} - количество поглощенного газа, кг; τ_a - время, с; $S_{ап}$ - площадь сечения аппарата, м².

При известном числе единиц переноса степень абсорбции может быть рассчитана по формуле [12]:

$$\eta_a = 1 - e^{-N_{ог}} \quad (20)$$

Представленная методика позволяет рассчитать основные параметры массообменного аппарата – энергозатраты и эффективность.

Список литературы

- 1 Раматуллаева Л.И. Гидродинамика и улавливание аэрозолей в аппарате с ударно-вихревым взаимодействием потоков: дис. ...канд. техн. наук. – Шымкент, 2009. – 113 с.
- 2 Волненко А.А. Научные основы разработки и расчета вихревых массообменных и пылеулавливающих аппаратов: дис. ... докт. техн. наук. – Шымкент, 1999. -300 с.
- 3 Серикулы Ж. Разработка и расчет тепломассообменных аппаратов с подвижной насадкой с учетом масштабного перехода: дис. ... доктора PhD. – Шымкент. 2015. -141 с.
- 4 Сарсенбекулы Д. Методология расчета и проектирования аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры: дис. ... доктора PhD. – Шымкент. 2017. -143 с.
- 5 Торский А.О. Гидродинамика и пылеулавливание в циклонно-вихревом аппарате: дис. ... доктора PhD. – Шымкент, 2020. –117 с.
- 6 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. – 180 с.
- 7 Балабеков О.С., Волненко А.А. Расчет и конструирование тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой /Монография – Шымкент, 2015. – 184с.
- 8 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.
- 9 Алиев Г.М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: справ.изд. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
- 10 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.
- 11 Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
- 12 Кафаров В.В. Основы массопередачи (системы газ-жидкость, пар-жидкость, жидкость-жидкость). 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1979. – 439с.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт внедрения

« УТВЕРЖДАЮ»

Председатель правления

АО «АЗХС»

Химич А.А.

02 2024г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских
и опытно- конструкторских работ

ЗАКАЗЧИК – АО «Актюбинский завод хромовых соединений».

НАСТОЯЩИМ АКТОМ ПОДТВЕРЖДАЕТСЯ, что результаты работы «Разработка теплообменного аппарата с регулярной вращающейся насадкой, методики расчета и рекомендаций по проектированию промышленных образцов»,

ВЫПОЛНЕННОЙ сотрудниками ЮКУ им М.О.Ауэзова,

ПРОВОДИМОЙ в период 01.01.2024г. по 31.12.2024г.

ВНЕДРЕНА на АО «Актюбинский завод хромовых соединений».

1. Вид внедряемых результатов: техническая документация на теплообменный аппарат с регулярной вращающейся насадкой, методика расчета и рекомендации по проектированию промышленных образцов.

2. Характеристика масштаба внедрения: технологические схемы газоочистки в производствах хромовых соединений.

3. Форма внедрения: техническая документация.

4. Новизна результатов научно-исследовательских работ: технически новое решение по конструкции аппарата с регулярной вращающейся насадкой.

5. Опытно-промышленная проверка: будет проведена после установки и проведения опытно-промышленных испытаний в схемах газоочистки производств хромовых соединений.

6. Внедрена: техническая документация «Рекомендации по проектированию и методика расчета теплообменного аппарата регулярной вращающейся насадкой».

7. Достижимые результаты: прогнозируется снижение гидравлического сопротивления на 15-20%; повышение эффективности пылегазоулавливания на 40-50%.

8. Объем внедрения: определяется дополнительно, исходя из потребностей.

9. Социальный и научно-технический эффект: снижение воздействия вредных выбросов (газа, пыли) на окружающую среду, извлечение целевого продукта, улучшение условий труда.

Акт подписали:

От АО «АЗХС»

Начальник Производственного
отдела

Осыка А.В.

Начальник УТР

Бульбин С.В.

от ЮКУ им. М.Ауэзова

Руководитель темы, научный
консультант

_____ д.т.н., проф. А.А.Волненко

Ответственные исполнители:

_____ м.н.с. Д.К. Камалбек

_____ докторант А. Сериков

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Справка о внедрении

«Ақтөбе
хром қосындылары
зауыты» АҚ



АО «Актюбинский
завод хромовых
соединений»

030015 Қазақстан Республикасы,
Ақтөбе қ., Астана ауд.,
Өндіріс алаңы, 15 «Б» учаскесі
тел.: 8 (7132) 536501/536513,
факс: 8 (7132) 536508/536532,
e-mail: inform@azhs.kz
БИН 950640000404
ЖСК KZ756017121000002369
«Қазақстан Халық Банкі» АҚ-да
БИК HSBKZZKX



030015 Республика Казахстан,
г. Ақтөбе, р-н Астана,
Промышленная зона, участок 15 «Б»
тел.: 8 (7132) 536501/536513,
факс: 8 (7132) 536508/536532,
e-mail: inform@azhs.kz
БИН 950640000404
ИИК KZ756017121000002369
в АО «Народный Банк Казахстана»
БИК HSBKZZKX

Исх. № 16 - 269

Дата: «15» 02 2024 г.

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ

Настоящей справкой подтверждается, что «Рекомендации по проектированию и методика расчета теплообменного аппарата регулярной вращающейся насадкой» (разработчики д.т.н., профессор Волненко А.А. и докторант Сериков А.), приняты к использованию в АО «Актюбинский завод хромовых соединений» для расчета и модернизации газоочистного оборудования.

Председатель Правления АО «АЗХС»



Химич А.А.

Исп: Саггарова Р.Д.
Тел: Тел: 8 7132 5365001
+ 7 775247 75 95

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акт внедрения

Ф.7.07-14



АКТ

внедрения НИР по диссертации Серикова А.С. на тему «Гидродинамика и массообмен в аппарате с вихревым взаимодействием потоков в условиях вращательного движения насадочных элементов», на соискание степени доктора PhD выполненной в соответствии с госбюджетной НИР Б-21-01-05 «Разработка методики конструирования и расчета высокоэффективных теплообменных аппаратов и устройств общепромышленного назначения» на 2021-2025 год в учебный процесс.

Настоящий акт составлен по итогам НИР, выполненной на кафедре «Технологические машины и оборудование» в 2022-2025 годах.

В результате проведенных НИР получены расчетные зависимости для определения основных гидродинамических характеристик, параметров движения вращающихся элементов и массообмена, составляющие основу инженерных методик расчета. Основные результаты были опубликованы в журналах: 1. А.А. Волненко, А. Сериков, А.А. Абжапбаров, А.Э. Левданский, Д.К. Жумадуллаев. Расчет порозности и эквивалентного диаметра насадки теплообменного аппарата с регулярной вращающейся насадкой //Механика и технологии /Химические технологии. Научный журнал. – 2024. – №2(84). – С.289-298. 2. А.А. Волненко, А. Сериков, А.А. Абжапбаров, А.Э. Левданский, Д.К. Жумадуллаев. Анализ влияния конструктивных параметров на энергозатраты в теплообменном аппарате с регулярной вращающейся насадкой //Механика и технологии /Химические технологии. Научный журнал. – 2024. – №3(85). – С.276-286. 3. А. А. Volnenko, A. Serikov, A. A. Abzharbarov, D. K. Zhumadullayev, B. N. Korganbayev. Calculation of Motion Parameters and Hydrodynamic Characteristics of a Device Involving a Regular Rotating Packing //International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), Vol. 18, N. 6, 2024. – P. 274-282. 4. А.А. Волненко, А. Сериков, А.А. Абжапбаров, А.Э. Левданский, Д.К. Жумадуллаев. Расчет структурных составляющих жидкой фазы в теплообменном аппарате с регулярной вращающейся насадкой //Механика и технологии /Научный журнал. – 2024. – №4(86). – С.258-269.

(краткое описание научных результатов)

Настоящим актом подтверждается, что результаты НИР по созданию аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом и методика расчета

выполненные докторантом Сериковым А.С.

(должность, степень, звание, ф.и.о.)

под руководством д.т.н., профессора Волненко А.А. и д.т.н., доцента Левданского А.Э.

(должность, степень, звание, ф.и.о.)

внедрены в учебный процесс:

в лекционные занятия «Аппараты с подвижной и регулярной насадкой для процессов теплообмена и пылеуловливания» в разделе «Газопылеуловливающее оборудование»

(указывается наименование дисциплины и ее разделы)

в практические занятия «Аппараты с подвижной и регулярной насадкой для процессов теплообмена и пылеуловливания» для выполнения расчетов по заданию «Расчет аппарата с регулярной вращающейся насадкой с прямоугольными лопастями и кольцевым ободом»

(указывается наименование дисциплины и ее разделы)

Зав. кафедрой Хусанов А.

(подпись)

Научный руководитель темы

Волненко А.А.

(подпись)

Начальник отдела координации научной деятельности Серкебаев М.

(подпись)

Директор ДАВ
Науkenова А.С.

(подпись)

Директор ДАН
Назарбек У.Б.

(подпись)