

ЮЖНО-КАЗАХСТАНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. М.АУЭЗОВА

УДК 66.02.071.7

На правах рукописи

АБЖАПБАРОВ АБАЙ АКИЛБЕКОВИЧ

ГИДРОДИНАМИКА, ТЕПЛОМАССОБМЕН И ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ В  
ОДНОЗОННЫХ И ДВУХЗОННЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ  
ГАЗООЧИСТНЫХ АППАРАТАХ

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, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

	<b>НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....</b>	4
	<b>ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....</b>	5
	<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....</b>	6
	<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	10
<b>1</b>	<b>Современное состояние вопроса газоочистки и теплообмена в аппаратах с регулярно размещенной насадкой .....</b>	17
1.1	Аппараты для проведения процессов газоочистки и теплообмена. Классификация аппаратов.....	17
1.2	Конструкции, принцип действия и методики расчета одноступенчатых (однозонных и двухзонных) газоочистных аппаратов с регулярно размещенной насадкой.....	21
1.3	Конструкции, принцип действия и методики расчета двухступенчатых однозонных газоочистных аппаратов с регулярно размещенной насадкой.....	38
1.4	Постановка задач исследований.....	47
<b>2</b>	<b>Описание экспериментальных установок и методик проведения исследований.....</b>	49
2.1	Технологическая схема экспериментальной установки для исследования аппаратов с регулярно размещенной насадкой.....	49
2.2	Технологическая схема экспериментальной установки с аппаратом, использующим ударный механизм взаимодействия потоков.....	52
2.3	Технологическая схема экспериментальной установки с аппаратом, использующим центробежный механизм взаимодействия потоков.....	53
2.4	Методики проведения исследований.....	54
2.4.1	Методики исследования гидродинамических характеристик.....	54
2.4.2	Методики исследований коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи.....	54
2.4.3	Методики исследований эффективности процесса пылеулавливания...	57
<b>3</b>	<b>Гидродинамика, массообмен и пылеулавливание двухзонного аппарата с регулярно размещенной насадкой и двухсторонним подводом газового потока.....</b>	60
3.1	Конструкция одноступенчатого двухзонного аппарата с регулярно размещенной насадкой и двухсторонним подводом газового потока...	60
3.2	Гидродинамические закономерности.....	61
3.3	Массообменные характеристики и параметры пылеулавливания.....	70
3.4	Методика расчета аппарата.....	73
<b>4</b>	<b>Гидродинамика, тепломассообмен и пылеулавливание двухступенчатых аппаратов ударно – вихревого и циклонно – вихревого действия.....</b>	84
4.1	Конструкции аппаратов.....	84
4.2	Вихревые ступени контакта.....	87
4.2.1	Гидродинамические закономерности.....	87

4.2.2	Массообменные и теплообменные характеристики.....	92
4.2.3	Параметры пылеулавливания.....	94
4.3	Ступени ударного взаимодействия газа и жидкости и центробежного осаднения твердых частиц.....	96
4.3.1	Гидродинамические закономерности.....	96
4.3.2	Параметры пылеулавливания.....	100
4.4	Методики расчета аппаратов.....	103
4.4.1	Расчет вихревой ступени.....	103
4.4.2	Расчет ступени ударного взаимодействия газа и жидкости и центробежного осаднения твердых частиц.....	113
<b>5</b>	<b>Рекомендации по проектированию и эксплуатации газоочистных аппаратов и промышленные испытания.....</b>	<b>119</b>
5.1	Рекомендации по проектированию и эксплуатации промышленных аппаратов.....	119
5.2	Промышленные испытания аппарата циклонно-вихревого действия в технологической схеме очистки газов, отходящих от сушилки КС в производстве сульфата хрома.....	118
5.3	Промышленные испытания двухступенчатого комбинированного газоочистного аппарата с регулярной трубчатой насадкой в схеме очистки газов, отходящих от прокаточной печи в производстве окиси хрома металлургической.....	123
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>128</b>
	<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>131</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>141</b>

## 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.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

**Одноступенчатые аппараты** – аппараты, имеющие одну ступень контакта, в которой реализуется один или несколько механизмов взаимодействия фазовых компонентов (пленочные, насадочные, тарельчатые аппараты, скрубберы ударного действия, циклоны, аппараты с регулярной подвижной насадкой и регулярно-взвешенной насадкой, инерционно-турбулентные аппараты с регулярной подвижной насадкой и т.п.).

**Двухступенчатые аппараты** – аппараты, имеющие две автономные ступени контакта в каждой из которых реализуется один или несколько механизмов взаимодействия фазовых компонентов (ударный и вихревой в аппаратах ударно-инерционного действия с регулярной подвижной насадкой, центробежный и вихревой в аппарате циклонно-вихревого действия и т.п.).

**Однозонные аппараты** – аппараты, в контактной (рабочей) зоне которых реализуется один механизм взаимодействия фазовых компонентов (вихревой механизм взаимодействия газа и жидкости в аппаратах с регулярной подвижной насадкой, взаимодействие газа со стекающей пленкой в пленочных аппаратах, взаимодействие газа и жидкости в режиме барботажа в насадочных (со стационарной насадкой) и тарельчатых аппаратах, ударное взаимодействие газа с покоящейся жидкостью в скрубберах ударного действия, центробежный механизм осаждения в циклонных аппаратах и т.п.).

**Двухзонные аппараты** – аппараты, в контактной (рабочей) зоне которых реализуется два механизма взаимодействия фазовых компонентов (ударный и инерционный в инерционно-турбулентных аппаратах со взвешенной насадкой, ударный и вихревой в аппаратах ударно-инерционного действия с регулярной подвижной насадкой, вихревой и турбулентный в аппаратах с регулярно-взвешенной насадкой и т.п.).

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В диссертационной работе использованы следующие обозначения и сокращения:

- A – поверхность  $\text{м}^2$ ; коэффициент;  
a – удельная поверхность,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ; коэффициент;  
B – коэффициент;  
b – ширина (характерный размер) насадочных элементов, м;  
C – концентрация,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
D – диаметр, м; коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
d – размер (диаметр) капли, струи, частицы, м;  
F – поверхность,  $\text{м}^2$ ; сила Н;  
f – площадь,  $\text{м}^2$ ; относительная доля частиц;  
K – коэффициент;  
k – коэффициент;  
L – плотность орошения,  $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ ; длина, м;  
 $\ell$  – размер, м; капиллярная постоянная, м;  
G – массовый расход,  $\text{кг}/\text{с}$ ; сила, н;  
H – высота, м;  
h – размер, м;  
 $h_0$  – количество удерживаемой жидкости (КУЖ), м;  
 $\Delta h$  – количество вытесненной жидкости, м;  
 $h_1$  – зазор между срезом газового патрубка и зеркалом жидкости, м;  
 $h_d$  – динамический уровень жидкости, м;  
J – энтальпия кДж/Кмоль;  
M – момент количества движения; молекулярный вес,  $\text{кг}/\text{моль}$ ;  
m – масса, кг; коэффициент;  
 $m_k$  – параметр;  
 $m_y$  – удельное орошение,  $\text{л}/\text{м}^3$ ;  
N – мощность, Вт;  
n – коэффициент; число, шт;  
Ф – фактор разделения; содержание фракции, %;  
P – давление, Па;  
 $\Delta P$  – гидравлическое сопротивление, Па;  
Q – расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
q – диффузионный поток,  $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ ;  
R – радиус, м; газовая постоянная, Дж/( моль·град);  
r – радиус, м;  
S – площадь,  $\text{м}^2$ ;  
T – период, с; температура, град;  
t – шаг размещения элементов, м/м; время, с;  
U – скорость, м/с;  
u – скорость (относительная, истинная), м/с;  
V – объемный расход (производительность),  $\text{м}^3/\text{с}$ ; объем,  $\text{м}^3$ ;

$\vartheta$  – скорость, м/с; окружная скорость, м/с;  
 $\mathcal{E}$  – энергия диссипации, Вт/кг;  
 $W$  – скорость, м/с;  
 $x$  – влагосодержание, кг/кг;  
 $Z$  – концентрация, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\alpha$  – угол, град; коэффициент;  
 $\beta$  – коэффициент массоотдачи, м/с; угол, град;  
 $\gamma$  – удельный вес, Н/м<sup>3</sup>; угол, град;  
 $\delta$  – толщина, м;  
 $\varepsilon$  – порозность;  
 $\eta$  – эффективность, %;  
 $\theta$  – коэффициент, учитывающий степень взаимодействия вихрей;  
 $\lambda$  – коэффициент трения; расстояние, м;  
 $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с; коэффициент;  
 $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с; скорость, м/с;  
 $\xi$  – коэффициент сопротивления; осевая координата;  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м;  
 $\tau$  – время, с;  
 $\varphi$  – газосодержание, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  
 $\psi$  – коэффициент; модифицированный инерционный параметр;  
 $\omega$  – частота колебаний, с<sup>-1</sup>; угловая скорость, рад/с;

### Числа:

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

$$Sl = \frac{f \cdot d}{W} \text{ – Струхалия;}$$

$$Stk = \frac{\rho_u \cdot d_u^2 \cdot U_u}{18\mu_r} \text{ – Стокса;}$$

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

$$Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda} \text{ – Прандтля;}$$

$$Eu_L = \frac{\Delta P_L}{\rho_2 W_2^2} \text{ – Эйлера;}$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda} \text{ – Нуссельта;}$$

$$Sc = \frac{v}{D} - \text{Шмидта};$$

$$Fr = \frac{\rho \cdot W^2}{2\rho \cdot g \cdot \Delta h} - \text{число Фруда.}$$

### **Индексы:**

а – абсорбция;  
ап – аппарат;  
в – вертикальный; вихрь; воронка; витания;  
вх – входящий;  
вых – выходящий  
г – газа; горизонтальный;  
D – диффузионный;  
д – динамический;  
ж – жидкость;  
з – захвата; зона;  
к – конечная; капля; конический;  
кр – критический;  
L – орошаемый;  
м – молекулярный; миграции; мокрый; местный;  
н – начальная; насадка;  
общ – общий;  
ос – осаждения;  
отн – относительная;  
оп – опытный; опыт;  
п – пылеулавливания; пластина;  
пат – патрубок;  
пл – пленка;  
р – радиальный; рядов; разделительный;  
с – сопротивления; стационарный; сухой; струн;  
сл – слой;  
стр – струя;  
ср – средний;  
т – тяжести; твердая; турбулентный; трубы;  
тр – трение; трубы;  
тур – турбулентная;  
ул – уловленной;  
ф – фракционная;  
факт - фактический  
ц – циклона; центробежный;  
ч – частиц;  
э – эквивалентный; эффективный; эжекция;



экв – эквивалентный;  
яч – ячейка.

### **Аппараты:**

ИТПН – инерционно-турбулентный аппарат с подвижной насадкой;  
КАИТ - комбинированный аппарат инерционно-турбулентного действия;  
РПН – с регулярной подвижной насадкой;  
УИД с РПН – ударно-инерционного действия с регулярной подвижной насадкой.  
ПН – с подвижной насадкой;  
ТР – с трубчатой насадкой;  
ТВ – с трубчато-взвешенной насадкой;  
АДПП – аппарат с насадкой и двухсторонним подводом газового потока;  
АУВД с ТН – аппарат ударно - вихревого действия с регулярной трубчатой насадкой;  
АЦВД – аппарат циклонно-вихревого действия.

## ВВЕДЕНИЕ

**Оценка современного состояния решаемой научной проблемы.** Рост отраслей промышленности и модернизация действующих производств сопровождается резким увеличением количества разнообразных и сложных по составу выбросов в атмосферу, в том числе и тепловых потоков, что обуславливает загрязнение воздушного бассейна районов, прилегающих к промышленным предприятиям.

В настоящее время существующие технологические схемы очистки газов включают стадии, как правило, проводимые в отдельных аппаратах. К их числу относятся полые распылительные (форсуночные) аппараты, насадочные (со стационарной насадкой: кольца Рашига, Палля, седла Берля и др.) и тарельчатые аппараты [1,2,3,4].

Среди более поздних разработок для насадочных аппаратов можно выделить нерегулярные насадки NY-PAK, CASCADE-RINGS. Они имеют повышенное гидравлическое сопротивление, обладают сравнительно небольшой эффективностью. Регулярные насадки INTALOX, Sulzer, Koch, Norton, «Вакупак», «Глитч-Грид», Mellapak, MellapakPlus, Mellagrid, сетчатые насадки ВХ и СУ содержат каналы регулярной структуры, в связи с чем они имеют несколько меньшее гидравлическое сопротивление и более высокие показатели эффективности [5]. В Казанском национальном исследовательском технологическом университете и ООО ИВЦ «Инжехим» (г. Казань, Россия) разработаны разнообразные конструкции регулярной и нерегулярной насадки: сегментно регулярная рулонная насадка «Инжехим», регулярная рулонная гофрированная насадка, насадка рулонная просечная, регулярная насадка IRG, регулярная насадка ВІМ, нерегулярная насадка «Инжехим», насадка «Инжехим-2002», насадка «Инжехим 2003-М» [6-8]. В основном они применяются на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях, где используются чистые газы и жидкости.

Все рассмотренные аппараты имеют одну зону контакта и малоприспособлены для обработки газовых и жидкостных потоков, содержащих твердые частицы из-за угрозы их зарастания.

**Основанием** для разработки темы явился недостаточный объем результатов исследований газоочистного оборудования, имеющего несколько зон взаимодействия потоков и двухступенчатых аппаратов с зонами контакта в автономных ступенях, а также научно-обоснованных методик расчета их основных параметров.

**Исходными данными** к выполнению работы явились результаты исследований и методики расчетов циклонов, аппаратов ударно-инерционного действия и с регулярной подвижной насадкой.

**Обоснованием необходимости проведения научно-исследовательской работы** послужила необходимость создания новых конструкций газоочистного оборудования, имеющего несколько зон для реализации наиболее эффективных механизмов взаимодействия потоков и двухступенчатых аппаратов с зонами

контакта в автономных ступенях, их всестороннего исследования и получения научно-обоснованных методик расчета основных параметров.

**Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки.** Разработка конструкций газоочистного оборудования, имеющего несколько зон взаимодействия потоков и двухступенчатых аппаратов с зонами контакта в автономных ступенях и созданные методики расчета базируются на научных открытиях [9,10] о закономерностях вихревого взаимодействия фаз, фундаментальных законах механики жидкости, газа и аэрозолей, теорий тепломассообмена и пылеулавливания, что свидетельствует о высоком научно-техническом уровне разработки.

**Сведения о патентных исследованиях.** При разработке конструкций многозонных и двухступенчатых аппаратов патентные исследования проведены на глубину свыше сорока лет по странам СССР и России, США, Франции, Германии, Великобритании, Японии. Проведенный поиск позволил сделать выводы о достоинствах и недостатках известных способов и конструкций аппаратов, а сопоставительный анализ результатов патентных исследований сделать заключение, что предлагаемые нами конструкции аппаратов позволяют повысить эксплуатационную надежность, интенсивность и эффективность работы в процессах массообмена, контактного теплообмена и пылеулавливания.

**Сведения о метрологическом обеспечении научно-исследовательской работы.** В основу диссертационной работы положена официальная терминология Международной организации законодательной метрологии. В процессе проведения экспериментов использованы приборы, прошедшие государственную поверку в период эксплуатации, обеспечивающие соответствующий исследовательским и инженерным целям класс точности и 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.** Наиболее распространенными аппаратами мокрого типа являются полые форсуночные скрубберы, пенные аппараты дырчатыми и щелевыми провальными тарелками и со стабилизатором пенного слоя, скрубберы Вентури и жидкостно-инжекционные аппараты, насадочные аппараты со стационарной насадкой, аппараты с подвижным слоем орошаемой насадки, различных видов ротоклоны [11-15].

Известны также конструкции комбинированных аппаратов сочетающих несколько зон для проведения различных процессов, к числу которых можно отнести инерционно-турбулентные с подвижной (регулярной) насадкой с односторонним подводом газового потока [16-19], реализующие ударное взаимодействие потока газа с зеркалом жидкости и вихревое взаимодействие в зоне регулярной насадки. В таких аппаратах происходит эжекция жидкости в насадочную зону и поглотительный раствор для улавливания твердых частиц в зоне удара в качестве абсорбента используется для абсорбции газообразных

компонентов в насадочной зоне. Односторонний подвод газового потока в аппарат приводит к неравномерности газожидкостного слоя по высоте и его раскачке.

В комбинированном аппарате с автономными контурами орошения [20] для проведения процессов пылеулавливания и абсорбции предложено использовать различные поглотительные жидкости не смешивающиеся между собой. Для насадочной зоны это позволяет предотвратить образование отложений и повысить движущую силу процесса абсорбции.

Нами для проведения процессов пылеулавливания и тепломассообмена разработаны несколько конструкций аппаратов.

Одноступенчатый двухзонный аппарат с регулярно размещенной насадкой и двухсторонним подводом газового потока имеет патрубки, расположенные на противоположных сторонах корпуса аппарата, что позволяет решить проблемы неравномерности газожидкостного слоя по высоте и его раскачке [21].

Двухступенчатые аппараты ударно – вихревого действия с регулярной трубчатой насадкой [22] и циклонно – вихревого действия с регулярной пластинчатой насадкой [23] предназначены для отдельного проведения процессов пылеулавливания и абсорбции в автономных ступенях контакта. В нижней ступени контакта ударно – вихревого аппарата реализуется ударный механизм взаимодействия потоков, а в аппарате циклонно – вихревого действия используется центробежный механизм улавливания пыли в отсутствие орошения жидкостью. В верхней ступени контакта в обоих аппаратах осуществляется доулавливание пыли и процесс абсорбции с использованием закономерностей вихревого взаимодействия газа и жидкости в объеме трубчатой и пластинчатой насадки. Кроме того, в виду особенностей конструкции трубчатой насадки, в контактной зоне аппарата возможно проведение поверхностного и смешительного теплообмена.

Вместе с тем, недостаточный объем исследований и научно обоснованных методов расчета сдерживает внедрение предлагаемых аппаратов в промышленность.

В связи с этим, проведение исследований процессов пылеулавливания, массообмена и теплообмена, разработка методологии расчета и проектирования разработанных аппаратов, рекомендаций по их проектированию и эксплуатации являются актуальными.

Работа выполнялась в соответствии с направлением исследований по госбюджетной НИР Б-21-01-05 ЮКУ им. М.Ауэзова «Разработка методики конструирования и расчета высокоэффективных тепломассообменных аппаратов и устройств общепромышленного назначения» на 2021-2025 г.г., а также в рамках выполнения проекта по программе КН МОН РК АР09260240 на тему «Разработка способа вихревого взаимодействия потоков с возможностью регулирования температуры в зоне контакта и создание на его основе систем газоочистки» на 2021-2023 г.г.

**Объект и предмет.** Объектами исследования явились лабораторные и промышленные установки с аппаратами с регулярно размещенной насадкой и

двухсторонним подводом газового потока, ударно-вихревого и циклонно-вихревого действия.

Предметом исследований явились гидродинамические закономерности, параметры пылеулавливания, массообмена и теплообмена.

Методологической базой явились методы физических исследований гидродинамических закономерностей и получения опытных коэффициентов эффективности пылеулавливания, массообмена и теплообмена.

**Цель работы:** разработка научных основ гидродинамики, процессов пылеулавливания и тепломассообмена в одноступенчатых и двухступенчатых (однозонных и двухзонных) аппаратах, с двухсторонним подводом газового потока, ударно-вихревого и циклонно-вихревого действия, создание научно-обоснованных методов расчета, рекомендаций по эксплуатации и проектированию, проверка полученных результатов в опытно-промышленных условиях и внедрение в промышленности.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи:**

- классификация одноступенчатых и двухступенчатых тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов;

- экспериментальное исследование гидродинамических характеристик, массообмена и пылеулавливания аппарата ударно-вихревого действия с двухсторонним подводом газового потока и получение расчетных зависимостей гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости, газосодержания слоя, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и эффективности пылеулавливания;

- экспериментальное исследование гидродинамических характеристик, массообмена и пылеулавливания двухступенчатого аппарата ударно-вихревого действия с трубчатой насадкой и получение расчетных зависимостей гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости, газосодержания слоя, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи, эффективности пылеулавливания;

- экспериментальное исследование гидродинамических характеристик, массообмена и пылеулавливания двухступенчатого аппарата циклонно-вихревого действия и получение расчетных зависимостей гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости, газосодержания слоя, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и эффективности пылеулавливания;

- разработка научно-обоснованных инженерных методик расчета разработанных аппаратов и рекомендаций по проектированию и эксплуатации;

- проверка полученных результатов в опытно-промышленных условиях и внедрение в промышленности.

**Научная новизна работы** заключается в том, что на основе теоретических и экспериментальных исследований закономерностей ударного, центробежного и вихревого движения и взаимодействия потоков научно обоснована методология расчета аппаратов с регулярно размещенной насадкой и двухсторонним подводом газового потока, ударно-вихревого и циклонно-

вихревого действия для проведения процессов пылеулавливания, абсорбции и теплообмена. При этом:

- на основе анализа механизмов взаимодействия потоков газа и жидкости предложена классификация одноступенчатых и двухступенчатых теплообменников и пылеулавливающих аппаратов;

- при двухстороннем подводе газа, исходя из выявленных гидродинамических закономерностей ударного взаимодействия газового потока с жидкостью, эжекции жидкости и вихревого взаимодействия потоков газа и жидкости в объеме регулярно размещенной насадки, получены уравнения для расчета гидравлического сопротивления зоны эжекции и вихревой зоны контакта, их общего сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя насадочной зоны;

- исходя из выявленных закономерностей ударного взаимодействия газового потока с жидкостью, вихревого взаимодействия потоков газа и жидкости в объеме регулярно размещенной насадки двухступенчатого аппарата ударно-вихревого действия с трубчатой насадкой, получены уравнения для расчета гидравлического сопротивления ударной и вихревой ступеней контакта, их общего сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя насадочной зоны;

- исходя из условий движения теплоносителя в трубах с учетом местных сопротивлений и сопротивлений на трение получено уравнение для расчета гидравлического сопротивления;

- исходя из выявленных закономерностей движения газового потока по спирали, вихревого взаимодействия потоков газа и жидкости в объеме регулярно размещенной насадки двухступенчатого аппарата циклонно-вихревого действия, получены уравнения для расчета гидравлического сопротивления циклонной и вихревой ступеней контакта, их общего сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя насадочной зоны;

- на основе турбулентно-диффузионного механизма улавливания твердых частиц на каплях жидкости дано математическое описание турбулентного и диффузионного осаждения твердых частиц в зоне удара и регулярно размещенной насадки, а, используя диссипативный подход, получены расчетные зависимости для определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи;

- на основе центробежно-инерционного механизма улавливания твердых частиц разработана математическая модель центробежного и инерционного осаждения частиц в циклонной ступени двухступенчатого аппарата циклонно-вихревого действия.

**Практическая ценность работы.** Разработаны конструкции одноступенчатого двухзонного аппарата с регулярно размещенной насадкой и двухсторонним подводом газового аппарата [21] (Приложение А), двухступенчатых аппаратов ударно – вихревого действия с регулярной трубчатой насадкой [22] (Приложение Б) и циклонно – вихревого действия с регулярной пластинчатой насадкой [23] (Приложение В).

Разработаны методики расчета, рекомендации по проектированию и эксплуатации предложенных аппаратов для проведения процессов пылеулавливания, абсорбции и теплообмена.

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

**Апробация практических результатов.** По результатам проведенных исследований разработана конструкция промышленного аппарата циклонно-вихревого действия, которая внедрена на АО «Актюбинский завод хромовых соединений» в технологической схеме очистки газовых выбросов, отходящих от сушилки «КС» в производстве сульфата хрома (основного). При этом снижена концентрация выбросов пыли до  $C_{\text{цикл.вихр}}=0,088\text{г/с}$ , что в 4,6 раза ниже нормативных показателей.

Двухступенчатый комбинированный газоочистной аппарат с регулярной трубчатой насадкой внедрен в технологической схеме очистки газов, отходящих от прокалочной печи в производстве окиси хрома металлургической на АО «Актюбинский завод хромовых соединений». Данный аппарат заменил ранее установленный инерционно-турбулентный аппарат (ИТА). Сопоставительный анализ суммарных концентраций пылевых выбросов показал: для аппарата ИТА  $C_{\text{факт}}=0,0858\text{г/сек}$ ; для двухступенчатого аппарата ударно – вихревого действия с регулярной трубчатой насадкой  $C_{\text{факт}}= 0,06506 \text{ г/сек}$ . Эти данные ниже нормативного показателя в 4,76 и 6,27 раза, соответственно (приложение И).

Ранее нами проведены промышленные испытания и внедрение аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой в производстве монохромата натрия [24].

Кроме того, результаты НИР по разработке одноступенчатого двухзонного аппарата, аппаратов ударно-вихревого и циклонно-вихревого действия и методики их расчета внедрены в учебный процесс для проведения лекционных и практических занятий по дисциплине «Аппараты с подвижной насадкой для процессов теплообмена и пылеулавливания».

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:**

- классификация одноступенчатых и двухступенчатых теплообменных и пылеулавливающих аппаратов;
- уравнения для расчета гидравлического сопротивления зоны эжекции и вихревой зоны контакта, их общего сопротивления, количества удерживаемой

жидкости и газосодержания слоя насадочной зоны, полученные для аппарата с двухсторонним подводом газа;

- уравнения для расчета гидравлического сопротивления ударной и вихревой ступеней контакта, их общего сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя насадочной зоны полученные для двухступенчатого ударно-вихревого аппарата;

- уравнение для расчета гидравлического сопротивления при движении теплоносителя в трубах;

- уравнения для расчета гидравлического сопротивления циклонной и вихревой ступеней контакта, их общего сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя насадочной зоны полученные для двухступенчатого циклонно-вихревого аппарата;

- математическая модель турбулентного и диффузионного осаждения частиц в насадочной зоне аппарата и расчетные зависимости для определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи;

- математическая модель центробежного и инерционного осаждения частиц в циклонной ступени аппарата.



# **1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ГАЗООЧИСТКИ И ТЕПЛООБМЕНА В АППАРАТАХ С РЕГУЛЯРНО РАЗМЕЩЕННОЙ НАСАДКОЙ**

## **1.1 Аппараты для проведения процессов газоочистки и теплообмена. Классификация аппаратов**

Аппараты для проведения процессов газоочистки (абсорбции и пылеулавливания) и контактного теплообмена широко используются на предприятиях химической, нефтеперерабатывающей, нефтехимической газоперерабатывающей, металлургической, пищевой, химико-фармацевтической и энергетической отраслей, а также в производствах агропромышленного комплекса, строительных материалов. Вместе с тем, одной из основных причин простаивания и нерентабельности работы оборудования, созданного в 60-х годах прошлого столетия, является то, что используемая технология и техника обладает высоким материальным и энергетическим индексом.

При создании новой техники и технологии необходимо исходить из перспективных направлений научных и проектно-конструкторских работ в конкретной области знания с учетом реальных условий и требований к эксплуатации и изготовлению разработки. Причем при прогнозировании облика проектируемого объекта необходимо исходить из оценки положительных и отрицательных признаков известных аналогов [25].

В ближайшие годы развитие науки и техники по проблеме тепломассопереноса и пылеулавливания будет определено следующими направлениями: [26]

- создание методов, процессов и аппаратов, обеспечивающих получение конечных продуктов высокого качества, отвечающих наперед заданным технологическим требованиям;

- создание аппаратов с минимальными энергетическими затратами и позволяющих использовать вторичные энергоресурсы (в частности для проведения тепловых процессов – утилизации сбрасываемого тепла: отходящих газов, отработанного пара и т.п.);

- создание высокоинтенсивных аппаратов малой материалоемкости, работающих при экстремальных параметрах, использующих новые физические методы интенсификации процессов, например, применение плазменных процессов, СВЧ, лазерной технологии и т.д.;

- разработка и реализация процессов, поддающихся комплексной автоматизации и управлению, для высвобождения значительного количества обслуживающего персонала на промышленных предприятиях;

- создание типовых аппаратов и комплексных установок (в том числе большой единичной мощности) с целью увеличения серийности производства, перевода на массовое производство и, в конечном счете, резкого роста реальной производительности машиностроительных отраслей;

- разработка совмещенных, комбинированных, комплексных процессов и аппаратов с целью сокращения технологической линии, уменьшения затрат на их реализацию;

- создание методов, разработка процессов и аппаратов, способствующих решению проблем экологии, а также улучшению условий труда и исключению образования канцерогенных веществ.

Современные требования к теплообменным и пылеулавливающим аппаратам изменялись, т.к. претерпевали изменения концепции 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 и пылеулавливающие аппараты должны отвечать следующим требованиям.

**1. Энергоемкость.** При оценке этого показателя исследователи часто исходят из затрат на гидравлическое сопротивление, что неверно. Например, полые скрубберы имеют относительно низкое сопротивление при низкой интенсивности тепло- и массопереноса. Тогда как для достижения искомой эффективности, например, степени очистки газов, требуется ставить последовательно несколько таких аппаратов. При этом получение требуемой интенсивности сомнительно. В то же время увеличится суммарное энергопотребление, 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 (например, рассчитывая отношение числа Эйлера к числу Нуссельта или Шервуда).

**2. Высокая эффективность.** Безусловно, что этот показатель является наиболее важным. Он является первичным при увеличении объемов получаемой продукции, а также при создании экологических процессов и технологий. При достижении этой цели необходимо исходить из экономически рациональных путей.

**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 и пылеулавливающих 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 находятся на стадии разработки.

**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.

**6. Простота монтажа,** также является немаловажным фактором. Современной технологией сборки является блочная, поэтому при создании новых конструкций оборудования необходимо предусмотреть компоновку их из отдельных блоков.

**7. Простота эксплуатации.** В процессе эксплуатации колонных теплообменников и пылеулавливающих аппаратов используется минимальное количество вспомогательного оборудования (насосов, вентиляторов, затворов и т.д.), что повышает надежность установок.

**8. Нечувствительность к загрязнениям обрабатываемых газов и жидкостей.** Этот показатель может быть заложен конструктивно (например - изготовление теплообменных труб с накаткой, создание регулярной структуры насадочного слоя, использование вибрирующих и вращающихся насадочных элементов) или в принцип действия аппарата (использование взвешенной, фонтанирующей и циркулирующей насадки).

В настоящее время доля традиционных конструкций теплообменников и пылеулавливающих аппаратов (насадочных (со стационарной насадкой), тарельчатых, пленочных, центробежных, скоростных, фильтрационных и т.д.) довольно высока. Вместе с тем, создаются новые конструкции газоочистного оборудования, сочетающие в себе положительные качества своих предшественников. При этом очень часто отдаются предпочтение схемам с комбинированными аппаратами, вследствие их компактности и низкой материалоемкости [27].

Нами предложена классификация теплообменников и пылеулавливающих аппаратов, учитывающая традиционные механизмы взаимодействия потоков в одноступенчатых и двухступенчатых однозонных аппаратах, а также их комбинацию в одноступенчатых двухзонных аппаратах (рисунок 1.1). При этом выделены следующие механизмы взаимодействия потоков в одной зоне:

- вихревой (вихревое взаимодействие газа и жидкости в объеме регулярно размещенной насадки);
- турбулентный (турбулентное взаимодействие газа и жидкости в присутствии взвешенной насадки);
- пленочный (взаимодействие газа со стекающей пленкой жидкости);
- барботажный (взаимодействие газа и жидкости (в стационарной насадке и на тарелках) в режиме барботажа);
- распылительный (взаимодействие газа и капельной жидкости);
- ударный (ударное взаимодействие газа с покоящейся жидкостью);
- центробежный (осаждение твердых частиц в условиях действия центробежной силы);

- скоростной (взаимодействие газа и жидкости в стесненных условиях суженной трубы Вентури);
- электрический (осаждение твердых частиц в электрическом поле);
- фильтрационный (осаждение твердых частиц при прохождении пористой перегородки).

В двух зонах одной ступени возможно сочетание следующих механизмов взаимодействия потоков:

- ударно-турбулентный (ударное взаимодействие газа с покоящейся жидкостью и турбулентное взаимодействие газа и жидкости в присутствии взвешенной насадки);

- ударно-вихревой (ударное взаимодействие газа с покоящейся жидкостью и вихревое взаимодействие газа и жидкости в объеме регулярно размещенной насадки);

- турбулентно-вихревой (вихревое взаимодействие газа и жидкости в объеме регулярно размещенной насадки и турбулентное взаимодействие газа и жидкости, создаваемое взвешенной насадкой в межнасадочном пространстве регулярно размещенной насадки).



Рисунок 1.1 - Классификация тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов

Результаты исследований традиционных конструкций тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов широко представлены в классических трудах известных отечественных и зарубежных ученых. Поэтому, не останавливаясь на этих аппаратах, рассмотрим конструкции и результаты

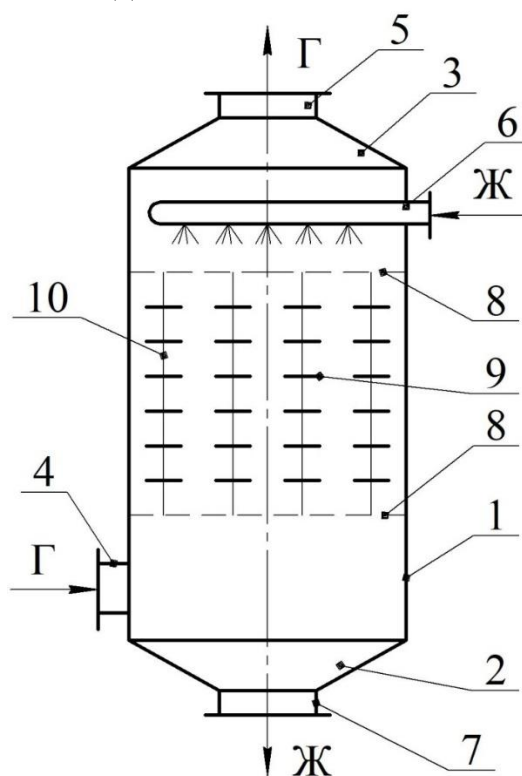
исследований оборудования для проведения процессов тепломассообмена и пылеулавливания с подвижной и регулярно размещенной насадкой, созданного на основе научных открытий [9,10] и получивших развитие в научной школе академика Балабекова О.С.

## 1.2 Конструкции, принцип действия и методики расчета одноступенчатых (однозонных и двухзонных) газоочистных аппаратов с регулярно размещенной насадкой

Одноступенчатые однозонные аппараты с регулярно размещенной насадкой представляют собой вертикальные колонные аппараты, в рабочей зоне которых на струнах закреплены насадочные элементы. В качестве насадочных элементов могут быть использованы пластины, шары, цилиндры, призматические тела квадратного, х-образного, треугольного поперечного сечения и др. [18, 28-31].

Наиболее исследованными конструкциями одноступенчатых однозонных аппаратов с регулярно размещенной насадкой являются аппараты с регулярной пластинчатой и трубчатой насадкой.

На рисунке 1.2 представлена конструкция аппарата с регулярной подвижной пластинчатой насадкой.



- 1 – корпус; 2 – днище; 3 – крышка; 4 и 5 – входной и выходной патрубки газа; 6 – ороситель; 7 – штуцер для слива жидкости; 8 – опорно-распределительные решетки; 9 – насадочные элементы; 10 – струны.

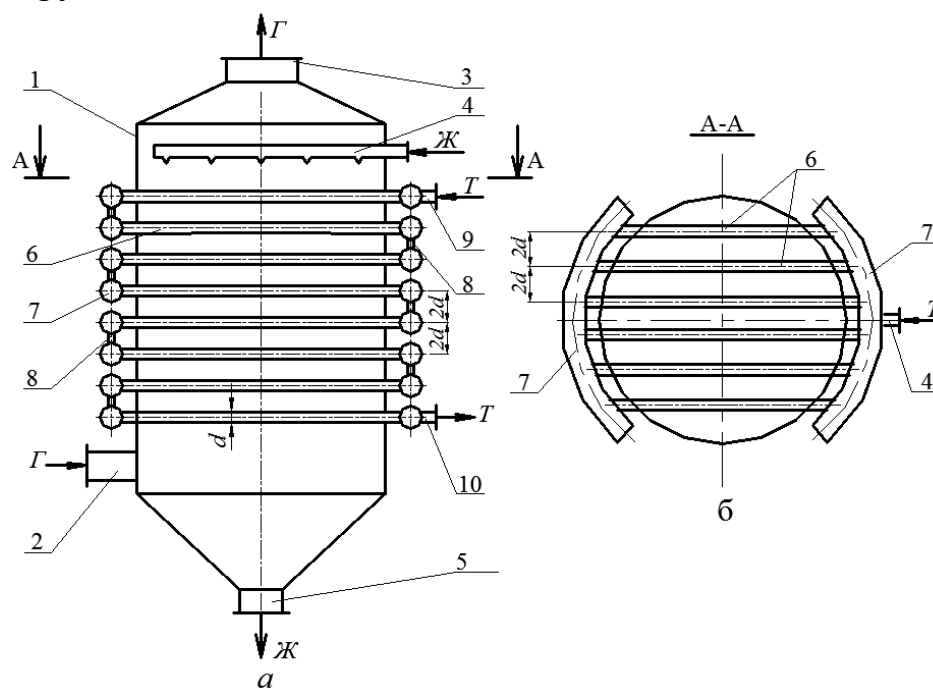
Рисунок 1.2 – Конструкция аппарата с регулярной подвижной пластинчатой насадкой

Аппарат с насадкой работает следующим образом. Газовый поток, поступающий на очистку, подается через штуцер 4, и пройдя нижнюю опорно-распределительную решетку 8, вступает в контакт с жидкостью, подаваемую через ороситель 6 в объеме насадочных тел 9, прикрепленных к струнам 10. Рабочая зона ограничена корпусом 1 и двумя опорно-распределительными решетками 8. После взаимодействия с жидкостью газовый поток удаляется через штуцер 5, а отработанная жидкость через штуцер 7.

При обтекании газовым потоком регулярно расположенных насадочных тел 9 на струнах 10 происходит образование и срыв вихрей, которые дробят жидкость, подаваемую через ороситель 6. Располагая насадочные тела с определенным шагом, достигают режима одновременного вихреобразования, при котором время образования вихрей совпадает со временем движения их от нижнего к верхнему слою насадочных тел. Слияние вихрей приводит к росту их мощности, что позволяет совершить большую работу по дроблению жидкости и тем самым получить развитую поверхность контакта фаз.

Необходимо отметить, что геометрическая форма насадочных элементов определяет механизм образования и срыва вихрей. Как было отмечено в работах [18 с.67, 28 с.52], за шаровыми насадочными элементами формируются симметричные вихри, а за призматическими насадочными элементами несимметричные вихри.

На рисунке 1.3 представлена конструкция аппарата с регулярно размещенной трубчатой насадкой [32].



- 1 – корпус; 2 и 3 - штуцеры для ввода и вывода газа; 4 – ороситель; 5 – патрубок для слива отработанной жидкости; 6 – трубы; 7 – коллекторы; 8 – соединительные штуцеры; 9 – патрубок подачи теплоносителя; 10 - патрубок слива теплоносителя.

Рисунок 1.3 – Аппарат с регулярно размещенной трубчатой насадкой

При работе аппарата газовый поток, поступающий на очистку, подается через штуцер 2. Взаимодействие газа и жидкости, подаваемой через ороситель 4, происходит в противоточном режиме в объеме насадочной зоны, представляющей собой пучок труб 6, с шагами расположения в вертикальном и радиальном направлениях, равным 2 диаметрам трубы. Расположение труб с указанными шагами приводит к тому, что создается полупериодный режим одновременного вихреобразования (синфазный режим) взаимодействия вихрей, образующихся за трубами. Этот режим характеризуется совпадением времени образования вихрей за трубами и временем движения образованных вихрей за цепочкой труб, расположенных по ходу движения газового потока. В момент подлета происходит взаимодействие подлетевших и завершивших цикл формирования вихрей за трубами. В результате такого взаимодействия суммарная мощность вихрей увеличивается, что позволяет совершить большую работу по дроблению орошающей жидкости и созданию высокоразвитой межфазной поверхности [32].

В трубном пучке движется теплоноситель, подача которого осуществляется по схеме патрубков 9 – коллектор 7 – трубы 6 – коллектор 7 – штуцер 8, далее нижерасположенные слои труб и вывод теплоносителя через патрубок 10.

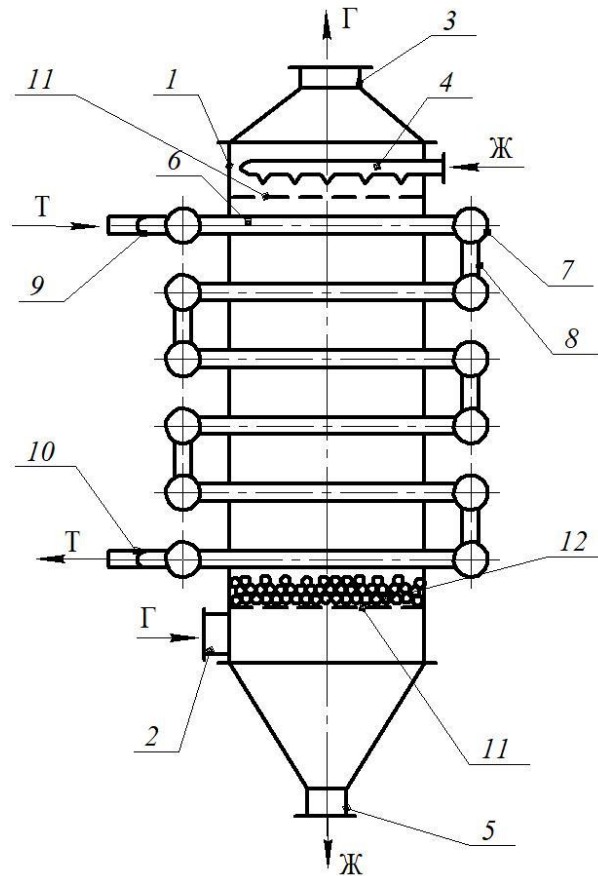
Выполнение контактного устройства в виде пучка труб, расположенных поперек движению газожидкостного потока, дает дополнительные преимущества, так как в этом случае возможен подвод тепла непосредственно в зону контакта фаз или отвод из нее, что является обязательным условием эффективного проведения многих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

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

Изготовление аппарата с трубной насадкой, у которого концы труб 6 каждого ряда насадки, выходящие за корпус аппарата, снабжены коллектором 7 для сбора жидкости и штуцером 8 для перелива жидкости на нижерасположенный ряд, позволяет организовать последовательное движение теплоносителя от точки ввода к точке вывода через слои труб по высоте контактной зоны аппарата (рисунок 1.3). При этом, в случае нагрева газожидкостного слоя, горячий теплоноситель, поступающий в верхний слой труб отдает тепло холодной жидкости, подаваемой через ороситель 4, и, наоборот, в случае охлаждения газожидкостного слоя холодный теплоноситель в верхнем слое труб принимает тепло орошающей жидкости. При движении теплоносителя от слоя к слою труб можно обеспечить максимальный теплосъем передаваемого тепла в объеме контактной зоны. В зависимости от заданных условий величину теплосъема можно регулировать количеством слоев труб, при условии обеспечения максимальной эффективности проводимого процесса в контактной зоне (абсорбции, пылеулавливания и т.д.).

Одноступенчатыми двухзонными аппаратами являются аппарат с комбинированной трубчато-взвешенной насадкой и аппарат с ударно-вихревого действия с пластинчатой насадкой.

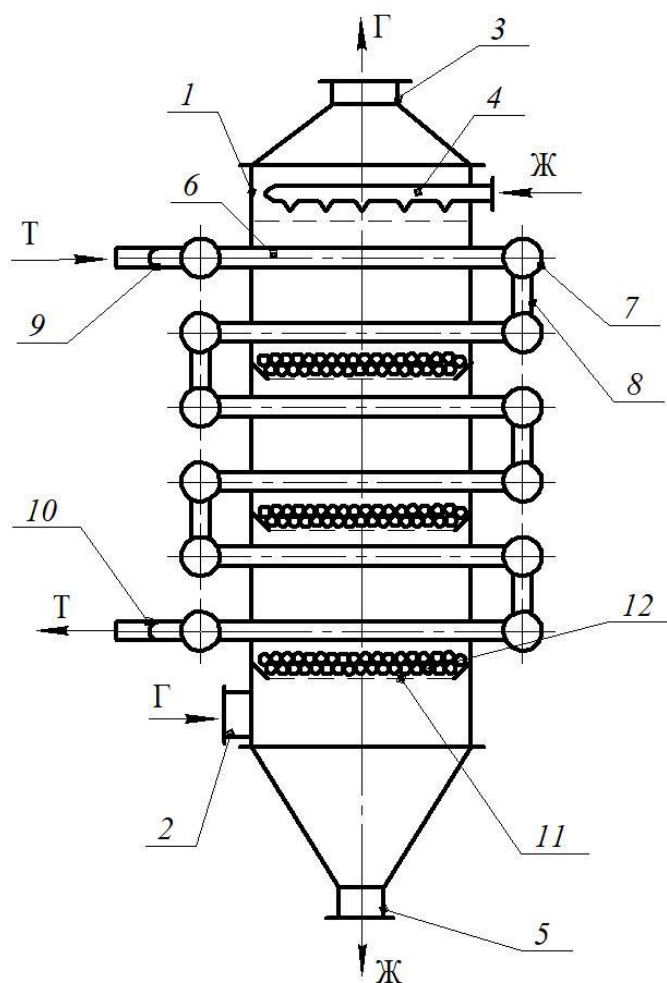
Для случая улавливания адгезионной пыли рекомендуется применение комбинированной трубчато-взвешенной насадки [33]. На рисунке 1.4 представлена конструкция аппарата с трубчато-взвешенной насадкой, имеющего плоскую опорно-распределительную решетку, на рисунке 1.5 конструкция аппарата с трубчато-фонтанирующей насадкой [34], имеющего конусную или пирамидальную опорно-распределительную решетку.



- 1 – корпус; 2 – штуцер для ввода газа; 3 - штуцер для вывода газа; 4 – ороситель;  
 5 – патрубок для слива отработанной жидкости; 6 – трубчатая насадка;  
 7 – коллекторы; 8 – соединительный штуцер; 9 – патрубок подачи теплоносителя;  
 10 – патрубок для слива теплоносителя; 11 – опорно-распределительная решетка;  
 12 - слой дискретных контактных элементов (шаров)

Рисунок 1.4 - Аппарат с трубчато-взвешенной насадкой





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

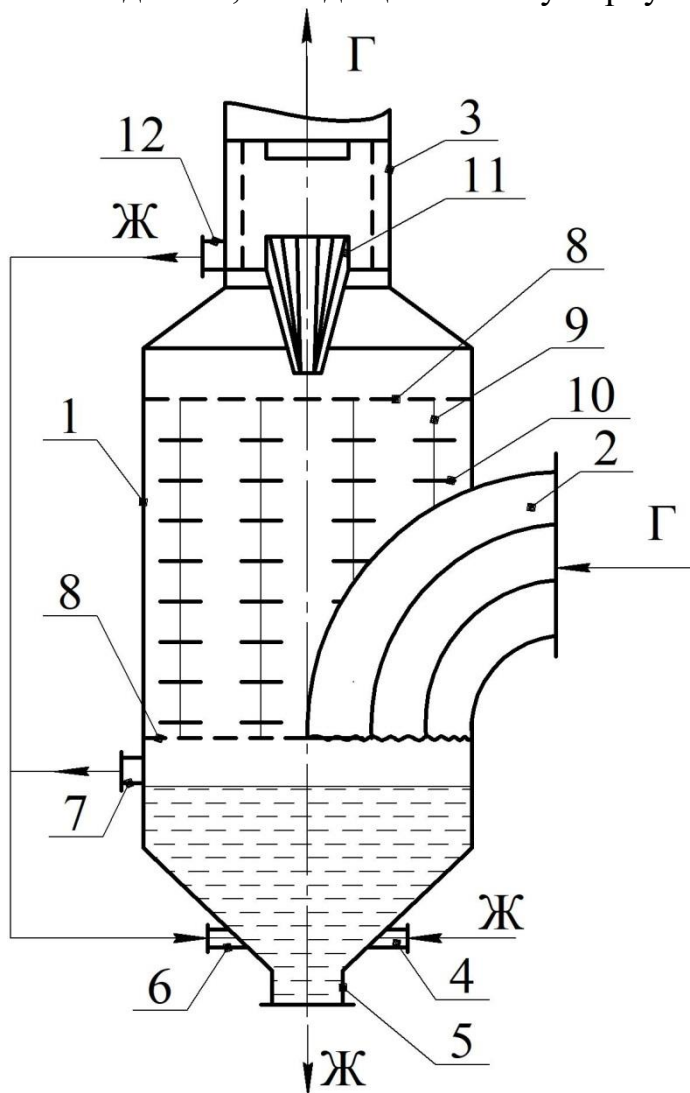
Рисунок 1.5 – Аппарат с трубчато-фонтанирующей насадкой

Такое конструктивное решение вобрало в себя положительные качества взвешенной насадки, а именно хаотическое перемещение в объеме рабочей зоны, что способствует очистке внутренних устройств от отложений и регулярное расположение насадочных элементов, несомненным преимуществом которого является использование механизма вихревого взаимодействия потоков.

При проектировании технологических схем очистки газов, связанных с многостадийными процессами, большое значение приобретают как интенсивность протекания процессов переноса, так и устойчивость систем к физико-химическим свойствам контактируемых сред. К аппаратам, частично удовлетворяющим этим условиям и предназначенным для параллельного ведения процессов пылеулавливания и абсорбции газов, относятся аппараты комбинированного типа – инерционно-турбулентные с подвижной (регулярной) насадкой (ИТПН), сочетающие зону ударно-инерционного взаимодействия

потока газа с зеркалом жидкости и насадочную зону с газокапельным взаимодействием [35]. Эти аппараты относятся к устройствам с внутренней циркуляцией жидкости с использованием **одноконтурной** системы орошения [18 с.143].

Во время работы газовый поток (рисунок 1.6), поступающий на очистку, подается в штуцер 2 и разделенный на части перегородками с высокой скоростью ударяется о поверхность жидкости, находящейся внизу корпуса 1.



- 1 – корпус; 2 и 3 – штуцеры ввода и вывода газа; 4 – патрубок для ввода свежей жидкости; 5 – патрубок вывода шлама; 6 и 7 – штуцеры для рециркуляции раствора и перелива жидкости; 8 - опорно-распределительные решетки; 9 – струны; 10 – насадочные элементы; 11 - конический центробежный завихритель; 12 – штуцер слива отсепарированной жидкости.

Рисунок 1.6 – Аппарат ударно-вихревого действия с регулярной пластинчатой насадкой

При ударе содержащиеся в потоке твердые частицы за счет инерционной силы осаждаются в жидкости. Под действием кинетической энергии газового потока подхватываемая жидкость в виде пленок и капель увлекается в

насадочную зону. При обтекании газовым потоком с диспергированной жидкостью регулярной насадки, где насадочные элементы закреплены с шагом, равным 1-4 калибра каждого предыдущего элемента, возникает синфазный режим.

Аппараты ИТПН с одноконтурной системой орошения нашли довольно широкое применение для улавливания слабослипающихся и нерастворимых пылей и абсорбции легкорастворимых газов. Однако при комплексной очистке газов, содержащих адгезионные пыли, их применение ограничено, т.к. возникают серьезные проблемы, связанные с зарастанием насадочной зоны отложениями, что негативно сказывается на эффективности и эксплуатационной надежности работы насадочной зоны и аппарата в целом. Другой проблемой является односторонний подвод газового потока, приводящий к неравномерности газожидкостного слоя по высоте и его раскачке. В интенсивных режимах это приводит к проскоку неочищенного газа.

**Методика расчета аппарата с регулярной подвижной пластинчатой насадкой**

Гидравлическое сопротивление рассчитывается по уравнению [18 с.87, 28 с.96]:

$$\Delta P_L = \xi_L \cdot \frac{H}{t_b} \cdot \frac{\rho_r W_r^2}{2\varepsilon_0^2}, \quad (1.1)$$

где  $\xi_L$  – коэффициент сопротивления орошаемой насадки;  $H$  – высота насадочной зоны, м;  $t_b$  – расстояние между элементами насадки в вертикальном направлении, м;  $\rho_r$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $W_r$  – скорость газового потока, м/с;  $\varepsilon_0$  – порозность насадки, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>.

Коэффициент сопротивления орошаемой насадки:

$$\xi_L = 0,27\theta_b\theta_p \text{Re}_{ж}^{0,2} \quad (1.2)$$

Число Рейнольдса определяется по уравнению:

$$\text{Re}_{ж} = \frac{U_{ж} \cdot d_{\text{экв}}}{\nu_{ж}}, \quad (1.3)$$

где  $U_{ж} = L/3600$  – скорость жидкости, м/с;  $\nu_{ж}$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $L$  – плотность орошения, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч.

Эквивалентный диаметр насадки:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4tb \cdot t_p^2 - b^2 \cdot \delta}{2b(b + 2\delta)}, \quad (1.4)$$

где  $\delta$  – толщина пластины, м.

Коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в вертикальном направлении  $\theta_b$  рассчитываем по формуле:

$$\theta_b = 0,85 + 0,15 \sin \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{4t_s \cdot Sl}{m_k} + 1 \right) \right] \quad (1.5)$$

Входящее в это уравнение число Струхалия для пластинчатых элементов  $Sl=0,15$ ;  $m_k$  - параметр, учитывающий вихреобразования, форму обтекаемых элементов и снижение скорости вихрей:

$$m_k = 0,329(1 - \exp(-t_b)) \quad (1.6)$$

Коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в радиальном направлении  $\theta_p$  рассчитывается по формуле:

$$\theta_p = \frac{t_p - \lambda}{t_p - d_p} \quad (1.7)$$

Для дискретно расположенных тел в одном ряду, перпендикулярно обтекаемому потоку возможны два случая: в первом случае масштаб и частота вихрей определяются шириной тела (при  $t_p \geq 2b$   $\lambda=b$ ), а во втором случае размером зазора между телами (при  $t_p < 2b$   $\lambda=t_p-b$ ).

Для расчета количества удерживаемой жидкости (КУЖ)  $h_0$  предложено уравнение:

$$h_0 = A \cdot \xi_L \cdot \frac{H}{t_s} \cdot \frac{\rho_r W_r^2}{2 \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot \varepsilon_0^2} \quad (1.8)$$

где опытный коэффициент  $A$  для аппарата с пластинчатой насадкой  $A=0,52$ .

Расчет газосодержания слоя производится по уравнению:

$$\varphi = \varepsilon - \frac{h_0}{H}, \quad (1.9)$$

где  $\varepsilon$  – объемная порозность насадки, которая может быть рассчитана по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \frac{b^2}{t_s \cdot t_p}. \quad (1.10)$$

Коэффициент массоотдачи в газовой фазе определяется по уравнению:

$$\beta_{zs} = B_{\beta_{zs}} \cdot \left[ \frac{D_z^2 \cdot C_k \cdot U_z^3 \cdot (h_0 - h_{nl})}{\varphi_{яч} (t_b - h_{nl}) \cdot d_k \cdot \nu_z} \right]^{1/4}, \quad (1.11)$$

где  $B_{\beta_{zs}} = 7,8 \left( \frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/4}$  - коэффициент пропорциональности;  $h_{nl}$  - пленочная составляющая КУЖ, м;  $U_z = W_z / \varphi_{яч}$  - истинная скорость газа в ячейке, м/с;  $\varphi_{яч} = 1 - \frac{h_k}{t_b} = 1 - \frac{h_0 - h_{nl}}{t_b}$  - газосодержание слоя в ячейке;  $h_k = h_0 - h_{nl}$  - капельная составляющая КУЖ, м.

Диаметр капель определяется по формуле:

$$d_k = B_k \cdot \xi_L^{1/3} \frac{\rho_{жс}^{1/6} \cdot \sigma^{1/3} \cdot d_{cmp}^{2/3} \cdot U_\Gamma}{\rho_\Gamma^{1/2} \cdot U_{cmp}^{5/3}}, \quad (1.12)$$

где  $B_k = 0,07$  - корректирующий коэффициент.

Толщина пленки жидкости на поверхности пластины:

$$\delta_{nl} = \left( \frac{U_{жс} \cdot b \cdot \nu_{жс}}{g} \right)^{1/3}. \quad (1.13)$$

$U_{стр}$  - скорость струи жидкости (м/с):

$$U_{cmp} = 1,28 \frac{\sigma^{1/2}}{\rho_z^{1/3} \cdot \rho_{жс}^{1/6} \cdot d_{cmp}^{1/2}} \quad (1.14)$$

$d_{cmp}$  - диаметр струи (м):

$$d_{cmp} = \frac{B_{cmp}}{\xi_L^{2/5}} \cdot \frac{\sigma^{3/5} \cdot \delta_{nl}^{2/5}}{\rho_{жс}^{1/5} \cdot \rho_z^{2/5} \cdot u_z^{6/5}}, \quad (1.15)$$

где  $B_{cmp} = 9,03$  - корректирующий коэффициент.

Уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в жидкой фазе для пластинчатой насадки:

$$\beta_{жс} = B_{\beta_{жс}} \cdot \left[ \frac{D_{жс}^2 \cdot \xi_L \cdot (1-\varepsilon) \cdot \rho_\Gamma \cdot U_\Gamma^3}{(1-\varphi_{яч}) \cdot \rho_{жс} \cdot \nu_{жс} \cdot \delta_n} \right]^{1/4} \quad (1.16)$$

где  $B_{\beta_{жс}} = 14,4$  - опытный коэффициент;  $\delta_n$  - толщина пластин, м.

**Методика расчета аппарата с регулярно размещенной трубчатой насадкой [18 с.91,19 с.64]**

Гидравлическое сопротивление орошаемого аппарата определяется по формуле (1.1).

Коэффициент сопротивления орошаемого аппарата рассчитывается по уравнению:

$$\xi_L = A \cdot \theta_s \cdot \theta_p \cdot \text{Re}_{ж}^m \quad (1.17)$$

Здесь  $A = 0,23$  – для аппарата трубами круглого сечения;

$A = 0,53$  – для аппарата трубами квадратного сечения;

$m = 0,1$  – показатель степени.

Коэффициент, учитывающий сдвиг в моментах вихреобразования:

$$\theta_s = 0,75 + 0,25 \sin \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{4t_s \cdot Sl}{d \cdot 0,43} + 1 \right) \right], \quad (1.18)$$

где  $d$  – для труб круглого сечения соответствует  $d_u$ , а для труб квадратного сечения  $v_k$ ;  $Sl$  – число Струхала для труб круглого поперечного сечения  $Sl=0,2$ , а для труб квадратного поперечного сечения  $Sl=0,136$ .

Коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в радиальном направлении и, учитывающий изменение частоты вихреобразования,  $\theta_p$  определяется по формуле (1.7).

Число Рейнольдса по жидкости определяется по уравнению (1.3).

Эквивалентный диаметр труб:

с круглым поперечным сечением

$$d_{экв} = \frac{4t_s \cdot t_p - \pi d_u^2}{\pi d_u} \quad (1.19)$$

с квадратным поперечным сечением

$$d_{экв} = \frac{t_s \cdot t_p \cdot v_k^2}{v_k} \quad (1.20)$$

Для оценки энергетических затрат использовано число Эйлера, которое определяется по формуле:

$$Eu_L = \frac{\Delta P_L}{\rho_z W_z^2} \quad (1.21)$$

Расчет количества удерживаемой жидкости производится по уравнению:

$$h_0 = (h_{пл} + h_k) \cdot \frac{H}{t_b} \quad (1.22)$$

Пленочная составляющая этого уравнения  $h_{пл}$  определяется по зависимости:

$$h_{пл} = \delta_{пл} (1 - \varepsilon_0) \quad (1.23)$$

Капельная составляющая  $h_k$  определяется по формуле:

$$h_k = A \cdot \xi_L \frac{p_{\Gamma} W_{\Gamma}^2}{2g\rho_{ж}} \cdot \frac{(2 - \varepsilon_0)(1 - \varepsilon_0^2)}{\varepsilon_0^2} \quad (1.24)$$

в которой опытный коэффициент  $A = 0,5$  – для трубчатого пучка с трубами круглого сечения;  $A = 0,3$  – для трубчатого пучка с трубами квадратного сечения;

Газосодержание слоя определяется по балансовой формуле (1.9). Объемная порозность  $\varepsilon$ , входящая в эту формулу (1.9) - для труб с круглым поперечным сечением  $\varepsilon = 1 - \frac{\pi d_u^2}{4t_{\varepsilon} \cdot t_p}$ ; для труб с квадратным поперечным сечением  $\varepsilon = 1 - \frac{b_k^2}{t_{\varepsilon} \cdot t_p}$ .

Порозность труб в слое рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{d}{t_p} \quad (1.25)$$

Здесь  $d$ , для труб круглого сечения соответствует  $d_u$ , а для труб квадратного сечения  $b_k$ .

Среднеинтегральные значения диаметра капель от основных режимных и конструктивных параметров определяются по уравнению:

$$d_k = B_k \frac{\sigma^{3/5}}{\rho_{ж}^{1/5} U_{\Gamma}^{6/5}} \left[ \frac{b \delta_{пл} \theta_p}{(d_u + b) \rho_{\Gamma} \theta_b} \right]^{2/5}, \quad (1.26)$$

где  $B_k = 18,8$  - для труб круглого поперечного сечения,  $B_k = 21$  - квадратного поперечного сечения.

Толщину пленки жидкости на поверхности труб определим по формуле:

$$\delta_{пл} = B_{пл} \cdot \left( \frac{U_{жс} d_{II} \nu_{жс}}{g} \right)^{1/3} \quad (1.27)$$

Расчетный коэффициент в уравнении (1.27) составляет: для труб круглого сечения  $B_{пл}=1$ ; для квадратного сечения  $B_{пл}=0,625$ .

Средняя скорость стекания пленки жидкости:

$$\bar{U}_{пл} = 0,666 \left( \frac{g}{\nu_{жс}} \right)^{1/3} U_{жс}^{2/3} d^{2/3}. \quad (1.28)$$

Длина лепестков пленки жидкости образовавшихся при отрыве от поверхности труб определяется по формуле:

$$e = \bar{U}_{пл} / f. \quad (1.29)$$

Диаметр струи, формирующейся из пленки жидкости определяется по формуле:

$$d_{стр} = \frac{B_{стр}}{\xi_L^{2/5}} \cdot \frac{\sigma^{3/5} \delta_{пл}^{2/5}}{\rho_{жс}^{1/5} \cdot \rho_г^{2/5} \cdot U_г^{6/5}} \quad (1.30)$$

Здесь  $B = 10$  для труб круглого сечения;  $B = 15,2$  для труб квадратного сечения.

Суммарная поверхность контакта фаз рассчитывается следующим образом [36]:

$$a_{\kappa} = \frac{3\sqrt{2}(1-\varphi)}{d_{\kappa}} \sqrt{\frac{1+\Phi^6}{\Phi^2}} + a_n, \quad (1.31)$$

где  $a_n$ —удельная поверхность трубчатых элементов: круглого сечения ( $a_n = \pi d/t_b \cdot t_p$ ); квадратного сечения ( $a_n = 4e_b/t_b \cdot t_p$ ).

Форма капли  $\Phi$  определяется по формуле:

$$\Phi = K W e^{1/5} \quad (1.32)$$

Значение  $K$  выбирается в зависимости от  $Re_{\kappa} = \frac{U_{\kappa} d_{\kappa}}{\nu_{\Gamma}}$ . При  $Re_{\kappa} > 800$   $K=1,1$ , в

области  $100 \leq Re_{\kappa} \leq 800$   $K = 5,5 Re_{\kappa}^{-1/4}$ . Эти значения  $K$  справедливы при  $We > 1$ .

Коэффициент массоотдачи в газовой фазе рассчитывается по формуле:

$$\beta_{zs} = B_{\Gamma} \left[ \xi_L \frac{(1-\varepsilon_0) D_{\Gamma}^2 \cdot U_{\Gamma}^3}{(\Gamma_0 - h_{пл}) \varphi_{яч} \cdot \nu_{\Gamma}} \right]^{1/4} \quad (1.33)$$

Опытный коэффициент для пучка труб круглого поперечного сечения составляет  $B_{\Gamma} = 24 \cdot \varphi$ ; квадратного поперечного сечения  $B_{\Gamma} = 25 \cdot \varphi$ .

В критериальном виде уравнение записывается следующим образом:



$$Sh^* = A_r \cdot Re_r^{3/4} \cdot Sc^{1/2} \quad (1.34)$$

Здесь  $A_r = B_r \cdot \left[ \frac{\xi_L (1 - \varepsilon_0)}{\varphi_{яч}} \right]^{1/4}$  - безразмерный параметр, характеризующий взаимодействие вихрей в орошаемом трубчатом пучке;

$Sh_r^* = \beta_{rs} \cdot t_b / D_r$  и  $Re_r^* = U_r \cdot t_b / \nu_r$  - модифицированные числа Шервуда и Рейнольдса, отнесенные к высоте ячейки  $t_b$ .

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле:

$$\alpha = B_\alpha \cdot c_p' \left[ \xi_L \frac{(1 - \varepsilon_0) D_r^2 \cdot U_r^3}{t_\delta \cdot \varphi_{яч} \cdot \nu_r} \right]^{1/4}, \quad (1.35)$$

где  $B_\alpha = 0,12$  - для труб круглого поперечного сечения;

$B_\alpha = 0,1$  - для труб квадратного поперечного сечения.

Уравнение (1.35) в критериальном виде запишется следующим образом:

$$Nu_r^* = A_\alpha \cdot \frac{Re_r^{*3/4} \cdot Pr_r}{Sc^{1/2}}, \quad (1.36)$$

где  $A_\alpha = B_\alpha \left[ \xi_L \frac{(1 - \varepsilon_0)}{\varphi_{яч}} \right]^{1/4}$  - безразмерный параметр, характеризующий

взаимодействие вихрей в орошаемом трубчатом пучке;  $Nu_r^* = \frac{\alpha \cdot t_\delta}{\lambda}$  и  $Re_r^* = \frac{U_r \cdot t_r}{\nu_r}$

- модифицированные числа Нуссельта и Рейнольдса, отнесенные к высоте ячейки;  $Pr_r = \frac{c \cdot \rho_r \cdot \nu_r}{\lambda}$  - число Прандтля.

**Методика расчета аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой [37-39]**

Гидравлическое сопротивление насадочной зоны определяется по формуле:

$$\Delta P_L = \Delta P_{тр} + \Delta P_{ПН} \quad (1.37)$$

Здесь гидравлическое сопротивление регулярной трубчатой насадки  $\Delta P_{тр}$  рассчитывается по формуле (1.1). Гидравлическое сопротивление взвешенного слоя орошаемой шаровой насадки по формуле:

$$\Delta P_{ПН} = (1 - \varepsilon_{ш}) \cdot \rho_n \cdot g \cdot H_{ст} + \kappa_s \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot h_{ж} \quad (1.38)$$

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

Количество удерживаемой жидкости рассчитывается по формулам:  
для трубчато-взвешенной насадки

$$h_0^{\text{общ}} = h_0^{\text{ТВ}} + h_0^{\text{ТР}} \quad (1.39)$$

где  $h_0^{\text{ТВ}}$  - количество жидкости удерживаемой взвешенной шаровой насадкой

$$h_{\text{ж}} = \frac{\rho_{\text{г}} \cdot W_{\text{г}}^2}{\rho_{\text{ж}} g Fr} \quad (1.40)$$

Критерий Фруда для аппарата с регулярно-взвешенной насадкой в уравнении (1.40) определяется по формуле:

$$Fr = A \left( \frac{W_{\text{г}}}{W_{\text{ж}}} \right)^{0,29} \cdot \left( \frac{H_{\text{СТ}}}{d_{\text{н}}} \right)^{-0,25} \left( \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,1}, \quad (1.41)$$

где  $A=0,0084$  – опытный коэффициент.

Количество удерживаемой жидкости (КУЖ) в аппарате с регулярной трубчатой насадкой определяется по формуле:

$$h_0^{\text{мп}} = 0,54 \cdot \xi_L \cdot \frac{H}{t_{\text{с}}} \cdot \frac{\rho_{\text{г}} W_{\text{г}}^2}{2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot \varepsilon_{\text{мп}}^2}, \quad (1.42)$$

где  $H$ - высота насадки, м;  $\rho_{\text{г}}$ - плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\xi_L$  - коэффициент сопротивления, учитывающий потери давления при взаимодействии вихрей в вертикальном и радиальном направлениях, на трение газа о поверхность насадочных элементов и пленку жидкости;  $\varepsilon_{\text{ТР}}$  порозность ряда насадки:

$$\varepsilon_{\text{ТР}} = 1 - \frac{d}{t_p} \quad (1.43)$$

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

$$h_0^{\text{общ}} = h_0^{\text{ТФ}} + h_0^{\text{ТР}} \quad (1.44)$$

Количество жидкости удерживаемой взвешенной шаровой насадкой определяется по формуле (1.40).

**Методика расчета аппарата ударно-вихревого действия с регулярной подвижной насадкой** [19 с.119, 28 с.127]

Гидравлическое сопротивление рассчитывают по формуле:

$$\Delta P_{\text{ап}} = \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{Л}}, \quad (1.45)$$

где  $\Delta P_{\text{э}}$  - гидравлическое сопротивление зоны эжекции, Па;  $\Delta P_{\text{Л}}$  - гидравлическое сопротивление насадочной зоны, Па.

Гидравлическое сопротивление зоны эжекции рассчитывают по уравнению:

$$\Delta P_{\text{э}} = \lambda \frac{\rho_{\text{г}} \cdot W_{\text{пат}}^2}{2} + \rho_{\text{ж}} g [(1 - \varphi_{\text{э}}) \Delta h], \quad (1.46)$$

где  $\Delta h$  - количество вытесненной в насадочную зону жидкости, определяют по формуле:

$$\Delta h = h_1 + h_{\text{д}}, \quad (1.47)$$

где  $h_1$  - зазор между срезом готового патрубка и зеркалом жидкости, м;  $h_{\text{д}}$  - динамический уровень жидкости, определяемый скоростным напором газового потока, м.

Величину  $h_{\text{д}}$  рассчитывают по формуле:

$$h_{\text{д}} = \lambda \frac{W_{\text{пат}}^2}{2g}, \quad (1.48)$$

где  $\lambda$  - опытный коэффициент (коэффициент сопротивления патрубка  $\lambda = \xi_{\text{пат}}$ ), значение которого определяют по следующей зависимости:

$$\lambda = \frac{3,15}{\text{Re}_{\text{пат}}^{0,5}}, \quad (1.49)$$

здесь  $\text{Re}_{\text{пат}} = \frac{W_{\text{пат}} \cdot d_{\text{пат}}}{\nu_2}$  - число Рейнольдса;  $W_{\text{пат}}$  - скорость газового потока в патрубке, м/с;  $d_{\text{пат}}$  - диаметр патрубка, м.

Газосодержание в зоне эжекции  $\varphi_{\text{э}}$  определяют по уравнению:

$$\varphi_{\text{э}} = 1 - \frac{1}{1 + \sqrt{Fr}}, \quad (1.50)$$

где  $Fr$  - модифицированное число Фруда:

$$Fr = \frac{\rho_{\text{г}} \cdot W_{\text{пат}}^2}{2\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot \Delta h}, \quad (1.51)$$

Гидравлическое сопротивление насадочной зоны рассчитывают по формуле (1.1), в которой коэффициент сопротивления орошаемой насадки:

$$\xi_L = 0,7 \cdot \theta_b \cdot \theta_p \cdot \frac{Re_{ж}^{0,25}}{Re_{г}^{0,1}}, \quad (1.52)$$

Значения величин, входящих в уравнение (1.52) определяют по следующим формулам: коэффициент  $\theta_b$  (1.5), с учетом (1.6),  $\theta_p$  (1.7); число Рейнольдса по жидкой фазе  $Re_{ж}$  (1.3).

Число Рейнольдса по газовой фазе определяется по уравнению:

$$Re_{г} = \frac{W_{г} \cdot d_{эКВ}}{\nu_{г}} \quad (1.53)$$

Эквивалентный диаметр пластинчатой насадки рассчитывается по формуле:

$$d_{эКВ} = \frac{2(t_b \cdot t_p^2 - b^2 \cdot \delta_h)}{b^2 + 2b \cdot \delta_h}, \quad (1.54)$$

а скорость движения жидкости  $U_{ж}$ , эжектируемой в насадочную зону:

$$U_{ж} = 0,024 \sqrt{g \cdot \Delta h} \quad (1.55)$$

Количество удерживаемой жидкости насадочной зоной рассчитывается по формуле (1.22) с учетом (1.23) и (1.24). Значение корректирующего коэффициента в уравнении (1.24)  $A=0,88$ . Газосодержание слоя рассчитывается по формуле (1.9).

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

$$\eta_{общ} = 1 - (1 - \eta_{Stk}) (1 - \eta_D), \quad (1.56)$$

где  $\eta_{Stk}$  и  $\eta_D$  – эффективность улавливания частиц за счет инерционного и диффузионного осаждения, соответственно.

Эффективность пылеулавливания за счет инерционного механизма рассчитывают по формуле:

$$\eta_{Stk} = 1 - \exp \left( -\frac{3}{2} \cdot \frac{m_y \cdot K_3 \cdot \rho_{омн} \cdot t_b}{U_{к} \cdot d_{к}} \right), \quad (1.57)$$

где  $m_y = \frac{V_{ж}}{V_{г}}$  – величина удельного орошения, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\vartheta_{отн} = |u_{ч} - u_{к}|$  – скорость осаждения частиц на капли, м/с;  $u_{к}$  – скорость движения капель, м/с;  $d_k$  – диаметр капель, м;  $K_3$  – коэффициент захвата.

Коэффициент захвата рассчитывают по уравнению:

$$K_3 = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,25)^2} \cdot \left( e^{-5,1 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{d_k}{d_{ч}}} - e^{-4,5 \frac{\ell_k}{d_k}} \right), \quad (1.58)$$

где  $Stk = \frac{\rho_{ч} \cdot d_{ч}^2 \cdot u_{ч}}{18\mu_{г} \cdot d_k}$  – критерий Стокса;  $\mu_{г}$  – динамическая вязкость газа, Па·с;  $d_{ч}$  – диаметр частиц, м;  $\ell_k = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{г} - \rho_{ж})}}$  – капиллярная постоянная, м;  $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м.

Диаметр капель жидкости в насадочной зоне рассчитывают по формуле (1.12):

$$d_k = B_k \cdot \xi_L^{1/3} \frac{\rho_{ж}^{1/6} \cdot d_{cmp}^{2/3} \cdot \sigma^{1/3} \cdot U_{г}}{U_{cmp}^{5/3} \cdot \rho_{г}^{1/2}},$$

Здесь  $d_{cmp}$  – диаметр струи, м;  $u_{cmp}$  – скорость струи, м.

Диаметр струи определяют по уравнению (1.15):

$$d_{cmp} = \frac{B_{cmp}}{\xi_L^{2/5}} \cdot \frac{\sigma^{3/5} \cdot \delta_{ш}^{2/5}}{\rho_{ж}^{1/5} \cdot \rho_{г}^{2/5} \cdot U_{г}^{6/5}},$$

а скорость струи (1.14):

$$U_{cmp} = 1,28 \frac{\sigma^{1/2}}{\rho_{г}^{1/3} \cdot \rho_{ж}^{1/6} \cdot d_{cmp}^{1/2}}.$$

Эффективность пылеулавливания за счет диффузионного осаждения рассчитывают по формуле:

$$\eta_D = 1 - (1 - \eta') \cdot (1 - \eta''), \quad (1.59)$$

где  $\eta'$  и  $\eta''$  – эффективность пылеулавливания зоны эжекции и насадочной зоны.

Эффективность пылеулавливания зоны эжекции рассчитывают по формуле:

$$\eta' = B'_k \cdot \left( \frac{W_{nam} \cdot d_{k1}}{D'_T} \right)^{-1/4}, \quad (1.60)$$

а эффективность пылеулавливания насадочной зоны по формуле:

$$\eta'' = B_k'' \cdot \left( \frac{W_\Gamma \cdot d_k}{D_T''} \right)^{-1/4}, \quad (1.61)$$

Входящие в выражения (1.60) и (1.61) коэффициенты турбулентной диффузии рассчитывают по уравнениям:

для зоны эжекции:

$$D_T' = B_1 (\xi_{nam})^{1/3} \cdot \left( \frac{\rho_\Gamma}{\rho_{ж}} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{1}{\Delta h} \right)^{1/3} \cdot d_{k_1}^{4/3} \cdot W_{nam} \cdot Stk; \quad (1.62)$$

для насадочной зоны:

$$D_T'' = B_2 (\xi_L)^{1/3} \cdot (1 - \varepsilon_0)^{1/3} \cdot \left( \frac{H}{t_b} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\rho_\Gamma}{\rho_{ж}} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{1}{h_0} \right)^{1/3} \cdot d_k^{4/3} \cdot u_\Gamma \cdot Stk \quad (1.63)$$

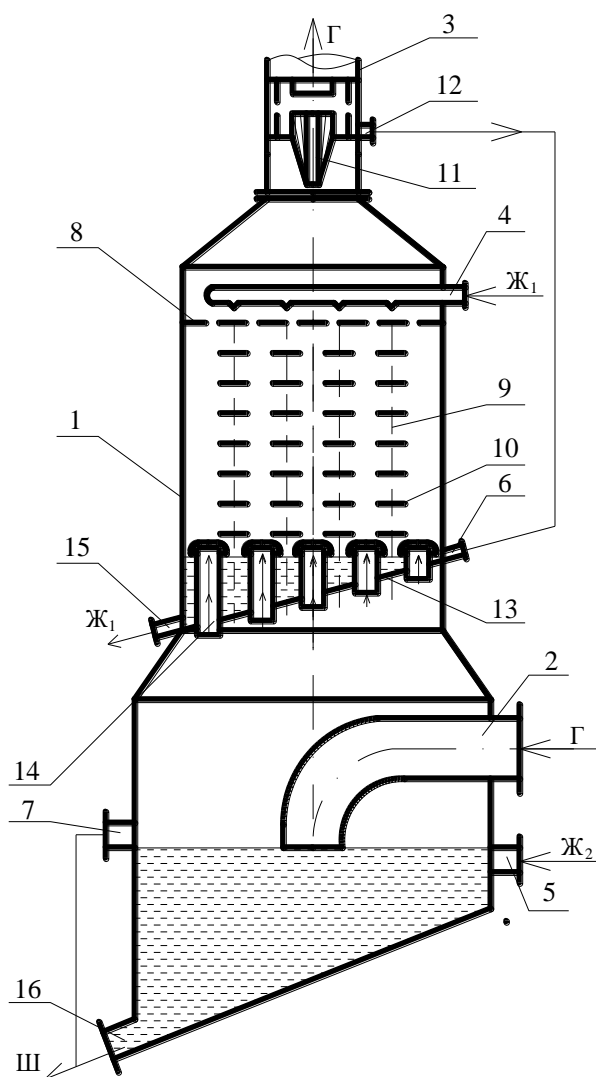
Диаметр капель, образующихся в зоне эжекции рассчитывают по формуле:

$$d_{k_1} = B_{k_1} \cdot \frac{\sigma^{3/5} \cdot (1 - \varphi_3)^{2/5} \Delta h^{2/5}}{\rho_{ж}^{1/5} \cdot \rho_\Gamma^{2/5} \cdot W_{пат}^{6/5}} \quad (1.64)$$

### 1.3 Конструкции, принцип действия и методики расчета двухступенчатых однозонных газоочистных аппаратов с регулярно размещенной насадкой

Анализ работы одноконтурной системы орошения показывает, что при наличии в очищаемом газе растворимых пылей возможно снижение степени абсорбции как легкорастворимых, так и плохо растворимых газов. Это объясняется присутствием в орошающем растворе добавочного растворенного компонента (не взаимодействующего с абсорбируемым газом), что понижает растворимость газов и ведет к повышению константы равновесия [20 с.20].

Указанные проблемы могут быть решены применением комбинированных пылеулавливающих аппаратов с автономными ступенями. В газоочистных аппаратах, использующих ударный и вихревой механизмы предусмотрены контуры орошения, отдельно для каждой из зон – ударно-инерционной и насадочной, которые позволят предотвратить образование отложений и повысить движущую силу процесса абсорбции. На рисунке 1.7 представлена конструкция комбинированного газожидкостного аппарата с автономными контурами орошения (КАИТ) [40].



1-корпус; 2 и 3 штуцеры для ввода и вывода газа; 4- патрубок для ввода свежей жидкости; 5- патрубок вывода шлама; 6 и 7- штуцеры для рециркулирующего раствора и перелива жидкости; 8- опорно-распределительные решетки; 9- струны; 10- конические пластинчатые насадочные элементы; 11- конический центробежный завихритель; 12- штуцер слива отсепарированной жидкости; 13- перегородка; 14- патрубки; 15 и 16- патрубки слива отработанной жидкости.

Рисунок 1.7 – Комбинированный газожидкостной аппарат с автономными контурами орошения и пластинчатой насадкой (КАИТ)

Во время работы газовый поток, поступающий на очистку, подается через штуцер 2 и с высокой скоростью ударяется о поверхность жидкости, находящейся в нижней части аппарата. При ударе содержащиеся в газовом потоке твердые частицы за счет сил инерции осаждаются в жидкости.

Очищенный от пыли газовый поток через патрубки 14, расположенные в наклонной перегородке 13, поступает в верхнюю ступень контакта. Взаимодействие газа и жидкости, подаваемой через ороситель 4, происходит в

противоточном режиме в объеме насадочной зоны. Расположение насадочных элементов 10 на струнах 9 выполнено таким образом, что создается синфазный режим взаимодействия вихрей, образующихся за насадочными телами. В результате такого взаимодействия суммарная мощность вихрей увеличивается, что позволяет совершить большую работу по дроблению орошающей жидкости и созданию высокоразвитой межфазной поверхности.

Установка наклонной перегородки 13 с патрубками и отбойными колпаками для прохода газа 14 позволяет отделить верхнюю и нижнюю ступень контакта и создать два автономных контура орошения. При этом, в случае улавливания пыли, имеющей высокую концентрацию и обладающую адгезионными свойствами, производится одной жидкостью за счет инерционного механизма, а доулавливание пыли за счет диффузионного механизма осуществляется жидкостью в верхней ступени контакта. Естественно, что свежий раствор позволяет произвести более глубокую очистку.

Кроме того, использование двух автономных контуров орошения позволяет совместить процессы пылеулавливания и абсорбции или же пылеулавливания и теплообмена. При этом в каждом контуре орошения может быть использована идентичная жидкость, а также различная в верхней и нижней ступенях контакта. Это дает возможность получения либо высококонцентрированных растворов, либо проведения избирательных процессов по абсорбции нужных компонентов.

***Методика расчета комбинированного газожидкостного аппарата с автономными контурами орошения и пластинчатой насадкой (КАИТ) [18 с.159, 20 с.67]***

Исходными данными для расчета являются режимные параметры: скорость газа в патрубке  $W_{пат}$ , м/с; зазор между срезом патрубка и зеркалом жидкости  $h$ , м; плотность орошения в насадочной зоне  $L$ ,  $м^3/(м^2 \cdot ч)$ ;  $c_n$  – концентрация пыли на входе в аппарат,  $кг/м^3$ ; конструктивные параметры: размеры насадки  $b$ , мм; шаги расположения насадки радиальном  $t_p/b$  и вертикальном  $t_v/b$  направлении, м;

**Расчет зоны пылеулавливания.**

Эффективность пылеулавливания определяют формуле [18 с.159]:

$$\eta_{Stk} = 1 - (1 - \eta_{Se})(1 - \eta_{Sk}), \quad (1.65)$$

где  $\eta_{Se}$ ,  $\eta_{Sk}$  – соответственно эффективность улавливания частиц на поверхности воронки и на каплях.

Эффективность улавливания взвешенных частиц на поверхности воронки определяют по уравнению [41]:

$$\eta_{Se} = \frac{\theta^2}{(\theta + 0.01)^2}, \quad (1.66)$$

Параметр инерционного осаждения  $\theta$  рассчитывают по соотношению:



$$\theta = 2Stk \cdot K_{\phi}, \quad (1.67)$$

Критерий формы жидкостной воронки  $K_{\phi}$  равен [20 с.50]:

$$K_{\phi} = \left[ \frac{1 - \cos \beta_{\phi}}{2k_b - 1} \right], \quad (1.68)$$

Число Стокса определяют по формуле:

$$Stk = \frac{W_{nam} \cdot \tau_{\text{ч}}}{D_{nam}}, \quad (1.69)$$

Угол раскрытия воронки  $\beta_{\phi}$ , рассчитывают следующим образом [20 с.49]:

$$\beta_{\phi} = \arccos \left[ \frac{D_{\phi} \cdot \sigma \cdot S_{\phi}}{\psi_{\phi} \cdot h_{\phi}^2 \cdot \rho_{\text{г}} \cdot Q_{\text{г}} \cdot W_{nam}} - 1 \right], \quad (1.70)$$

Диаметр воронки  $D_{\phi}$  определяют по уравнению:

$$D_{\phi} = 2k_b \cdot D_{nam}, \quad (1.71)$$

Глубина воронки  $h_{\phi}$  рассчитывают по формуле:

$$h_{\phi} = \xi_c \frac{\rho_{\text{г}} W_{nam}^2}{4g\rho_{\text{ж}}}, \quad (1.72)$$

Для расчета коэффициента сопротивления  $\xi_c$  используют соотношение:

$$\xi_c = \frac{300}{Re_{nam}^{0.33}}, \quad (1.73)$$

где  $Re_{nam}$  - число Рейнольдса для определения режима истечения газовой струи из патрубка, которое равно:

$$Re_{nam} = \frac{W_{nam} \cdot D_{nam}}{\nu_{\text{г}}}, \quad (1.74)$$

Коэффициент пропорциональности  $k_b$ , входящий в уравнения (1.68) и (1.71), рассчитывают по формуле:

$$k_b = \frac{0,708}{\xi_c} \cdot \ln(\sqrt{Re_{nam.}}), \quad (1.75)$$

Эффективность улавливания частиц пыли на каплях, образующихся в объеме воронки, определяется по уравнению [20 с.72]:

$$\eta_{Sk} = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{\rho_z}{\rho_{жк}} \frac{Kз}{d_k} \cdot \frac{\overline{\Delta u_{ч.к.}}}{u_{z.в.}} \cdot M\right), \quad (1.76)$$

в котором

$$M = M_{yc.} \cdot \left\{ \bar{L} - \frac{h_6}{C_k} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_k \cdot \bar{L}}{h_6}\right) \right] \right\}, \quad (1.77)$$

где  $M_{yc.} = (M_{жк} / M_z)$ ;  $M_{жк} = \rho_{жк} \cdot q_{жк}$ ;  $M_z = \rho_z \cdot q_z$ ;  $E_k = 0,25$  – эмпирический коэффициент;  $C_k = M_{жк} / (q_z \cdot V_k \cdot \rho_{жк})$  – концентрация капель;  $\bar{L} = (\pi \cdot D_{nam}) / K_\phi$  – средняя длина канала в воронке.

Коэффициент захвата  $Kз$  рассчитывают по формуле Ленгмюра:

$$Kз = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,125)^2}, \quad (1.78)$$

Диаметр патрубка определяется из условия оптимальной эффективности улавливания, которая, согласно экспериментальным исследованиям соответствует скоростям истечения  $W_{nam} = 30 \div 35$  м/с:

$$D_{nam.} = \sqrt{\frac{Q_z}{0,785 \cdot W_{nam}}}, \quad (1.79)$$

Диаметр аппарата в области зоны пылеулавливания определяется исходя из скорости витания капель, минимальный диаметр которых равен  $d_{м.к.} = 0,23 \cdot 10^{-3}$  м:

$$D_{з.п.} = \sqrt{\frac{Q_z}{0,785 \cdot (0,9 \cdot W_{в.к.})}}, \quad (1.80)$$

Здесь  $W_{в.к.}$  – скорость витания капель с диаметром  $d_{м.к.}$ . Коэффициент 0,9 указывает на то, что скорость в зоне пылеулавливания должна быть меньше скорости витания капель, т.е. должно выполняться условие  $W_{з.п.} < W_{в.к.}$ , тогда воспользовавшись уравнением Годеса число Рейнольдса по газовой фазе определяется

$$Re_z = Ar / (18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar}), \quad (1.81)$$

для скорости витания:

$$W_{в.к.} = \frac{Ar \cdot v_{\Gamma}}{(18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar}) \cdot d_{м.к.}}, \quad (1.82)$$

где  $Ar = (d_{м.к.}^3 \rho_{ж} g) / (v_{\Gamma}^2 \rho_{\Gamma})$  - число Архимеда.

Расчеты показывают, что для систем близких по физико-химическим свойствам к системе «воздух – вода» диаметр зоны пылеулавливания равен:

$$D_{з.п.} = 6D_{nam}, \quad (1.83)$$

Высота зоны пылеулавливания определяется через максимальную высоту витания капель  $h_{в.к.}$  и высоту стационарного слоя жидкости:

$$H_{з.п.} = h_{в.к.} + h_{с.сл.}, \quad (1.84)$$

Максимальная высота витания капель рассчитывается по уравнению:

$$h_{в.к.} = 2,1 \left( \frac{D_{nam.}}{D_{з.п.}} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{q_{ж}}{W_{в.к.}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.85)$$

Высота стационарного слоя жидкости является функцией глубины воронки, тогда для двойной глубины можно записать:

$$h_{с.сл.} = 2h_e, \quad (1.86)$$

### **Расчет зоны абсорбции.**

Количество поглощаемого компонента определяется по соотношению:

$$G_k = G \cdot (y_1 - y_2), \quad (1.87)$$

где  $y_2$  - концентрация компонента в отходящем газовом потоке.

Общее уравнение материального баланса имеет вид:

$$G_k (y_1 - y_2) = L(x_2 - x_1), \quad (1.88)$$

Конечное содержание поглощаемого компонента  $y_2$  в газовом потоке определяется по формуле:

$$x_2^* = \frac{1}{m_0} y_2, \quad (1.89)$$

в которой  $x_2^*$  - равновесная концентрация компонента в жидкости;  $m_0$  - константа фазового равновесия (константа Генри).

В случае присутствия в абсорбенте добавочного растворенного компонента константа фазового равновесия рассчитывается по формуле [20 с.78]:

$$m_p = \frac{m_p^0}{1 - (\delta_2 + \delta^- \nu^+ + \delta^+ \nu^-) C_2^{0,75}}, \quad (1.90)$$

в которой  $C_2$  – концентрация электролита;  $\nu^+$  и  $\nu^-$  – валентности положительных и отрицательных ионов;  $\delta_2, \delta^-, \delta^+$  – поправочные коэффициенты на присутствие растворенного вещества, отрицательных и положительных ионов.

Эффективность зоны абсорбции (РПН) определяется через скорость растворения газа в абсорбенте и поверхность контакта фаз  $F$ , образуемой в слое РПН:

$$G_k = \frac{dG}{d\tau} = K_S \cdot F \cdot \Delta, \quad (1.91)$$

где  $K_S$  – поверхностный коэффициент массопередачи и  $\Delta$  - движущая сила процесса.

Поверхность контакта фаз с учетом плотности распределения капель по размерам записывается следующим образом:

$$F_k = \frac{3\sqrt{2}h_k}{\int_{d_{m,k}}^{d_{k,k}} d_{p,k} f(d_{p,k}) d(d_{p,k})}, \quad (1.92)$$

где  $h_k$  - количество удерживаемой жидкости в слое насадки.

Вид функции плотности распределения капель по размерам рассчитаем по уравнению [20 с.80]:

$$f(d_k) = 1,89 \left( \frac{d_k}{d_k} \right)^3 \exp \left[ -0,7 \left( \frac{d_k}{d_k} \right)^3 \right], \quad (1.93)$$

Коэффициент массопередачи  $K_S$  определяется по выражению:

$$K_s = \frac{1}{(1/\beta_z + 1/m\beta_{ж})}, \quad (1.94)$$

Коэффициент массоотдачи по жидкой фазе (для плохо растворимых газов) определяется по следующей обобщенной формуле:

$$Sh_{ж} = B_{ж} \left( \frac{\rho_z}{\rho_{ж}} \right)^{1/4} Re_z^\alpha We^{1/10} Sc_{ж}^{1/2}, \quad (1.95)$$

Показатель степени при числе Рейнольдса  $\alpha$  и коэффициент  $B_{ж}$  зависят от режима обтекания капли: при  $Re_k < 100$ ,  $\alpha = 3/4$  и  $B_{ж} = 0,47 \cdot \psi_k$ ; при  $100 < Re_k < 800$ ,  $\alpha = 5/8$  и  $B_{ж} = 1,43$ ; при  $Re_k \geq 800$ ,  $\alpha = 3/4$  и  $B_{ж} = 0,57$ .

Коэффициент массоотдачи по газовой фазе (для легко растворимых газов) вычисляется по критериальному уравнению:

$$Sh_z = B_z Re_k^\beta We^{2/5} Sc_z^{1/3}, \quad (1.96)$$

Здесь при  $Re_k < 100$ ,  $\alpha = 1/2$ ,  $B_z = 2$  и  $We \approx 1$ ; при  $100 < Re_k < 800$ ,  $\beta = 0$  и  $B_z = 50$ ; при  $800 \leq Re_k \leq 2000$ ,  $\beta = 1/2$  и  $B_z = 1,6$ ; при  $Re_k > 2000$ ,  $\beta = 4/5$  и  $B_z = 0,16$ .

В случае прямолинейной равновесной зависимости и постоянства  $\rho_z$  и  $\rho_{ж}$  число единиц переноса рассчитывается по формуле:

$$N = \frac{K_V \cdot V_{з.а.}}{G_k} = \frac{K_V \cdot S \cdot H_{з.а.}}{G_k} = N_z + \frac{m_p \cdot G_k \cdot N_{ж}}{L}, \quad (1.97)$$

где  $V_{ан}$  - объем аппарата;  $S$  - площадь поперечного сечения;  $L$  - плотность орошения, оптимальная величина которой изменяется в диапазоне  $20 \div 50 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ;  $H_{з.а.}$  - высота зоны абсорбции, которая определяется по уравнению:

$$H_{з.а.} = \frac{N \cdot G_k}{K_V \cdot S}, \quad (1.98)$$

Диаметр аппарата в области зоны абсорбции рассчитывается по формуле:

$$D_{з.а.} = \sqrt{\frac{Q_z}{0,785 \cdot W_{з.а.}}}, \quad (1.99)$$

где  $W_{з.а.}$  - скорость газа в зоне абсорбции, которую рекомендуется выбирать исходя из соображений предотвращения брызгоуноса в интервале  $- 1,0 \div 2,0 \text{ м/с}$ .

Общая высота аппарата определяется как сумма высот зон пылеулавливания и абсорбции. К этому необходимо добавить высоты зон разделительной тарелки, оросителя и отвода газа из аппарата, которые, вместе взятые, составляют 10÷15% от общей высоты.

**Расчет гидравлического сопротивления.**

Исходя из правила аддитивности гидравлических сопротивлений зон обработки газа, для общего сопротивления формула имеет вид [20 с.97]:

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_n + \Delta P_{p.m.} + \Delta P_{аб}, \quad (1.100)$$

где  $\Delta P_n, \Delta P_{p.m.}, \Delta P_{аб}$  - гидравлические сопротивления соответственно зоны пылеулавливания, разделительной тарелки и зоны абсорбции.

Гидравлическое сопротивление зоны пылеулавливания  $\Delta P_n$  складывается из потерь скоростного напора и потерь энергии на образовании воронки с транспортом капельной жидкости, тогда суммарное уравнение записывается в виде:

$$\Delta P_n = \xi_c \frac{\rho_z W_{nam}^2}{2} + \rho_{ж} g h_g + \frac{4\sigma}{D_{nam}}, \quad (1.101)$$

где  $h_g$  - глубина жидкостной воронки:

После подстановки которой в уравнение (1.101), предварительно пренебрегая вторым слагаемым в скобках, ввиду его малости в сравнении с первым слагаемым, получено:

$$\Delta P_n = \frac{3}{8} B_{он.} \xi_c \rho_z W_{nam}^2 + \frac{4\sigma}{D_{nam}}, \quad (1.102)$$

где  $B_{он.} = 0,7$  - опытный коэффициент.

Гидравлическое сопротивление разделительной тарелки  $\Delta P_{p.m.}$  можно определить по уравнению для однофазных потоков [29]:

$$\Delta P_{p.m.} = \xi_{p.m.} \frac{H_0^2 \rho_z W_z^2}{S_0^2 \cdot 2}, \quad (1.103)$$

где  $\xi_{p.m.}$  - коэффициент сопротивления тарелки;  $W_z$  - скорость газа в зоне пылеулавливания;  $H_0$  - высота патрубков тарелки, отнесенная к диаметру отверстия;  $S_0$  - свободное сечение разделительной тарелки.

Гидравлическое сопротивление абсорбционной зоны  $\Delta P_{аб}$ , определяется по уравнению, предложенному в работе [29] для регулярной пластинчатой насадки

при использовании фактора гидродинамического состояния двухфазной системы:

$$\Delta P_{аб} = \Delta P_c \left[ 1 + 0,14 \left( \frac{u_{пл} \cdot \varepsilon_0}{Sl \cdot W_2} + 1 \right)^2 \right], \quad (1.104)$$

где  $\Delta P_c$  - гидравлическое сопротивление сухой насадки;  $u_{пл}$  - скорость пленки на пластине;  $Sl$  - число Струхаля;  $\varepsilon_0$  - порозность ряда насадки.

Для расчета  $\Delta P_c$  в этой же работе [29] предложена формула:

$$\Delta P_{p.m.} = \xi_{c.n.} \theta_\varepsilon \frac{H \rho_2 W_2^2}{t_\varepsilon 2\varepsilon_0^2}, \quad (1.105)$$

в которой  $\xi_{c.n.}$  - коэффициент сопротивления пластины;  $\theta_\varepsilon$  - коэффициент, учитывающий потерю давления при сдвиге в моментах вихреобразования;  $t_\varepsilon$  - шаг между пластинами в вертикальном направлении;  $H$  - высота насадки.

#### 1.4 Постановка задач исследований

В настоящее время накоплен значительный опыт по созданию тепломассообменного и пылеулавливающего колонного оборудования. Его создание тесно связано с развитием новых технологий и постановкой задач и требований, предъявляемых к оборудованию для обеспечения заданной эффективности и энергетических затрат. Для реализации поставленных задач в той или иной степени были изучены механизмы взаимодействия потоков газа и жидкости, такие как пленочный, распылительный, барботажный, центробежный, турбулентный, ударный, скоростной, электрический, фильтрационный, вихревой. При умеренных скоростях взаимодействующих потоков достаточно эффективными являются пленочный, распылительный, барботажный. Повышенную эффективность в этих условиях (умеренные скорости) имеют электрический, фильтрационный механизмы.

В интенсивных режимах взаимодействующих фаз наиболее эффективными являются центробежный, турбулентный, ударный, скоростной и вихревой механизмы. В этом случае создается высокоразвитая межфазная поверхность, обеспечивающая высокую эффективность проводимых процессов. Однако при этом наиболее энергозатратными являются турбулентный, ударный и скоростной механизмы, наименее энергозатратными – центробежный и вихревой.

Сочетание различных механизмов взаимодействия потоков газа и жидкости в одной ступени способствовало созданию новых конструкций аппаратов значительно интенсифицирующих проводимые процессы. Так, сочетание ударного и вихревого взаимодействия потоков привело к созданию ударно-турбулентного (ИТПН) и ударно-вихревого (УИД с РПН) аппаратов.

Использование этих же механизмов в двухступенчатом аппарате привело к созданию комбинированного газожидкостного аппарата с автономными контурами орошения [20 с.10]. В таком аппарате возможно проведение комплексной очистки многокомпонентных газов.

Нами разработаны несколько конструкций аппаратов для проведения процессов абсорбции, контактного теплообмена и пылеулавливания. В качестве одноступенчатого однозонного аппарата – аппарат с регулярно размещенной трубчатой насадкой и подводом теплоносителя во взаимно перпендикулярных плоскостях [42, 43]. В качестве одноступенчатого двухзонного аппарата – аппарат ударно-вихревого действия с двухсторонним подводом газового потока [21]. В качестве двухступенчатых однозонных аппаратов - аппарат циклонно-вихревого действия [23] и аппарат ударно-вихревого действия с трубчатой насадкой [22].

Для проведения всесторонних исследований и создания научно обоснованных методов расчета разработанных аппаратов необходимо выполнение следующих задач:

- классификация одноступенчатых и двухступенчатых теплообменных и пылеулавливающих аппаратов;
- экспериментальное исследование гидродинамических характеристик, массообмена и пылеулавливания аппарата ударно-вихревого действия с двухсторонним подводом газового потока и получение расчетных зависимостей гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости, газосодержания слоя, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и эффективности пылеулавливания;
- экспериментальное исследование гидродинамических характеристик, массообмена и пылеулавливания аппарата циклонно-вихревого действия и получение расчетных зависимостей гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости, газосодержания слоя, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и эффективности пылеулавливания;
- экспериментальное исследование гидродинамических характеристик, массообмена и пылеулавливания аппарата ударно-вихревого действия с трубчатой насадкой и получение расчетных зависимостей гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости, газосодержания слоя, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи, эффективности пылеулавливания;
- разработка научно-обоснованных инженерных методик расчета разработанных аппаратов и рекомендаций по проектированию и эксплуатации;
- проверка полученных результатов в опытно-промышленных условиях и внедрение в промышленности.



## 2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК И МЕТОДИК ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1 Технологическая схема экспериментальной установки для исследования аппаратов с регулярно размещенной насадкой

Технологическая схема установки для исследования аппаратов с регулярно размещенной насадкой представлена на рисунке 2.1. Экспериментальная установка включала модель аппарата квадратного сечения (340x340 мм), выполненную из оргстекла [44].

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

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

Данная схема позволяла проводить исследования для двух случаев. В первом случае при подаче нагретого воздуха циркуляция жидкости осуществляется холодным теплоносителем. Во втором случае теплоноситель нагревался в напорной емкости 5 с помощью нагревательного устройства 4 и поступал в трубчатый пучок 8.

Диапазон изменения:

режимных параметров:

– скорость газа  $w_r$  - 1÷5 м/с;

– плотность орошения  $L$  - 10÷75 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч;

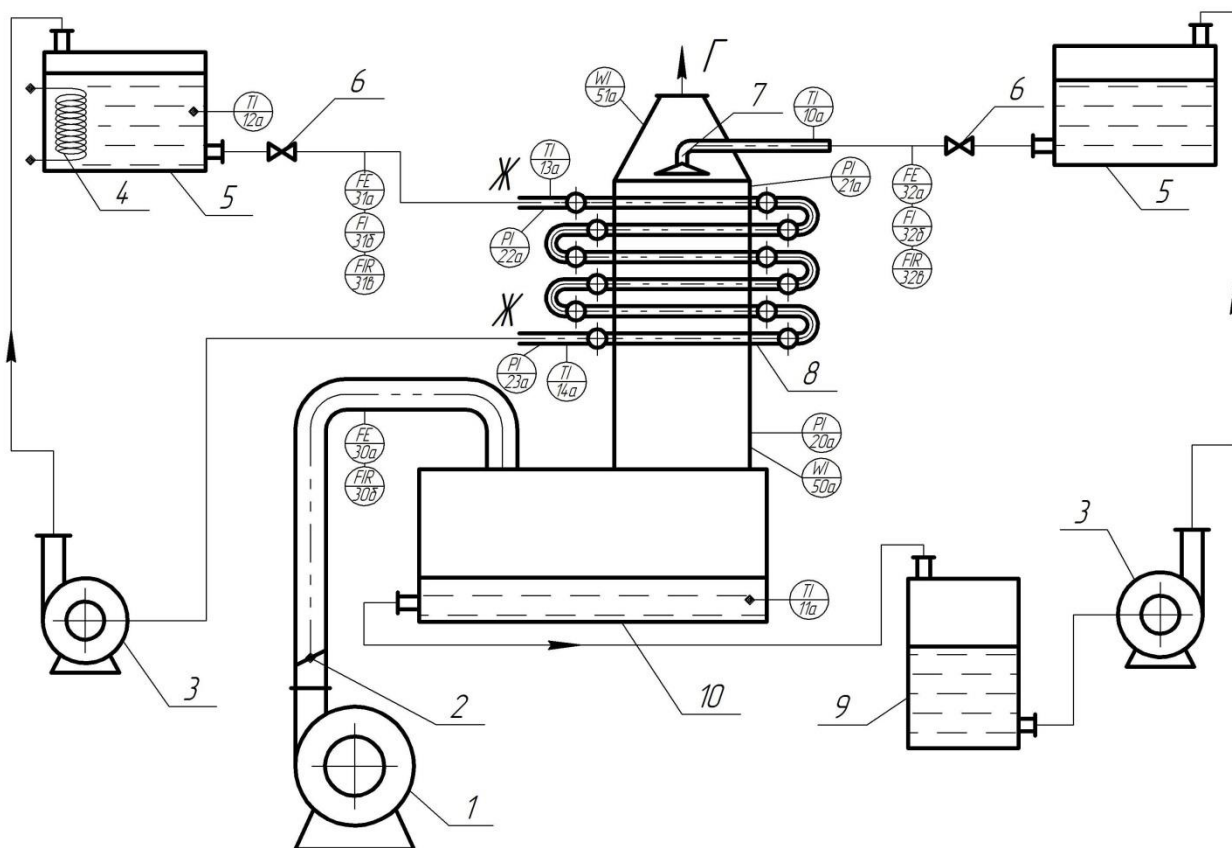
- температура воздуха  $t_{\text{возд.}}$  = 20÷100 °С;

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

конструктивных параметров:

трубчатая насадка:  $d = 0,025$  м;  $l = 0,34$  м;  $t_b/d$  - 2;  $t_p/d$  - 2;

пластинчатая насадка:  $b \times b \times \delta = 40 \times 40 \times 1$  мм;  $t_b/b$  - 2;  $t_p/b$  - 2.



- 1 – вентилятор; 2 – шибер; 3 – насос; 4 – нагревательное устройство;  
 5 – напорная емкость; 6 – вентиль; 7 – ороситель; 8 – трубчатый пучок;  
 9 – промежуточная емкость; 10 - аппарат с трубчатой насадкой.

Рисунок 2.1 - Технологическая схема установки для исследования аппаратов с регулярно размещенной насадкой

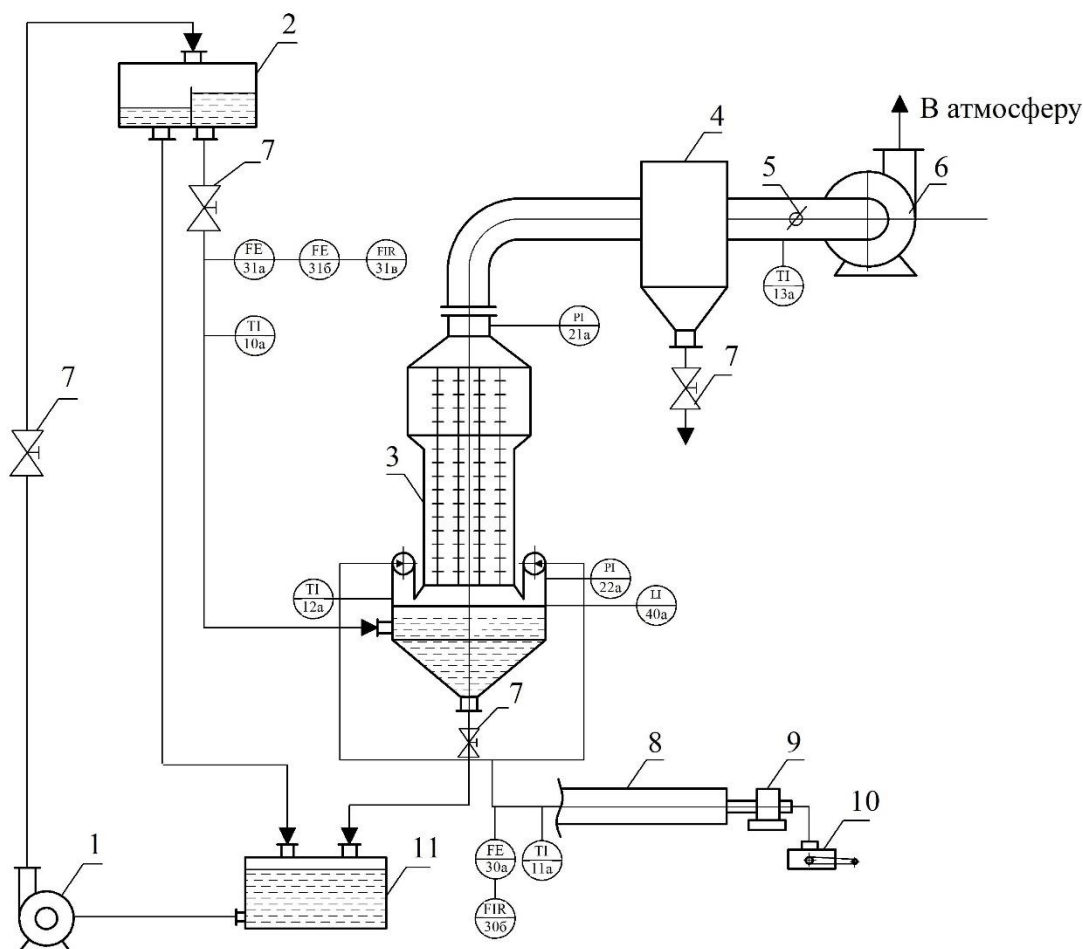
## 2.2 Технологическая схема экспериментальной установки с аппаратом, использующим ударный механизм взаимодействия потоков

Экспериментальная установка для изучения гидродинамических характеристик и параметров пылеулавливания в аппарате ударно-вихревого действия с регулярной насадкой представлена на рисунке 2.2.

Технологическая схема включала аппарат 3, насос 1, вентилятор 6, циркуляционную 11 и напорную 2 емкости, каплеуловитель 4, устройство для подачи пыли, включающее входной газоход 8 пылеподатчик 9 и компрессор 10, вентили 7.

Установка работала под разрежением в режиме противотока. Поток воздуха, отсасываемый вентилятором 9 поступал по входному газоходу 8, имеющему тройник для разделения потока и подачи его через два патрубка в нижнюю часть аппарата 3, заполненную жидкостью. Имея повышенную скорость, воздушный поток ударялся о поверхность жидкости, подхватывал ее и эжектировал в насадочную зону. Дальнейшее взаимодействие газа и жидкости осуществлялось в слое регулярной пластинчатой насадки, включающей струны с закрепленными на них насадками. После взаимодействия, газовой поток по газоходу через

каплеуловитель 4 и вентилятор 6 выбрасывался в атмосферу, а жидкость под действием силы тяжести стекала в нижнюю часть аппарата.



- 1 - насос; 2 - напорная емкость; 3 - аппарат УИД с РПН; 4 - каплеуловитель;  
 5 - шибер; 6 - вентилятор; 7 - вентиль; 8 - входной газоход; 9 - пылеподатчик;  
 10 - компрессор; 11 - циркуляционная емкость

Рисунок 2.2 - Схема экспериментальной установки с аппаратом ударно-инерционного действия с регулярной подвижной насадкой

Стекание жидкости, уловленной в каплеуловителе 4, осуществлялось в циркуляционную емкость 11. Регулирование расхода газового потока производилось шибером 5 по показаниям диафрагмы.

Циркуляция жидкости производилась по следующему контуру: из циркуляционной емкости 11 насосом 1 жидкость подавалась в напорную емкость 2. Избыток жидкости через переливной карман возвращался в циркуляционную емкость 11, а основной ее поток направлялся в нижнюю часть аппарата 3. Заданный уровень жидкости поддерживался с помощью переливного устройства, через который циркулирующая жидкость стекала в емкость 11. В случае проведения экспериментов по пылеулавливанию (когда существует возможность отложения осадка) жидкость из нижней части аппарата 3

полностью сливалась через нижней патрубков аппарата в циркуляционную емкость 11 и далее в канализацию. Аппарат имел коническое днище.

Изменение уровня жидкости и характер образования водяного «холма» определялись визуально при помощи шкалы делений, нанесенной на корпусе аппарата. Характерные режимы фиксировались с помощью фотосъемки.

В качестве параметров, определяющих гидродинамические характеристики аппарата, выбраны: гидравлическое сопротивление аппарата  $\Delta P_{an}$ , зоны эжекции  $\Delta P_э$  и насадочной зоны  $\Delta P_L$ , количество удерживаемой жидкости  $h_o$ , газосодержание  $\varphi$ , статический  $h_l$  и динамический  $h_d$  уровни жидкости.

Диапазон изменения:

а) режимных параметров

- скорость газа  $W_r = 2 \div 7 \text{ м/с}$ ;

- зазор между срезом патрубка и зеркалом жидкости  $h_l = +0,04 \div -0,04 \text{ м}$ .

б) конструктивных параметров

- размер пластинчатых насадочных элементов  $b = 0,04 \times 0,04 \text{ м}$ ;

- шаг между насадочными элементами по вертикали  $t/b = 2$ ;

- шаг между насадочными элементами в радиальном направлении  $t_r/b = 2$ .

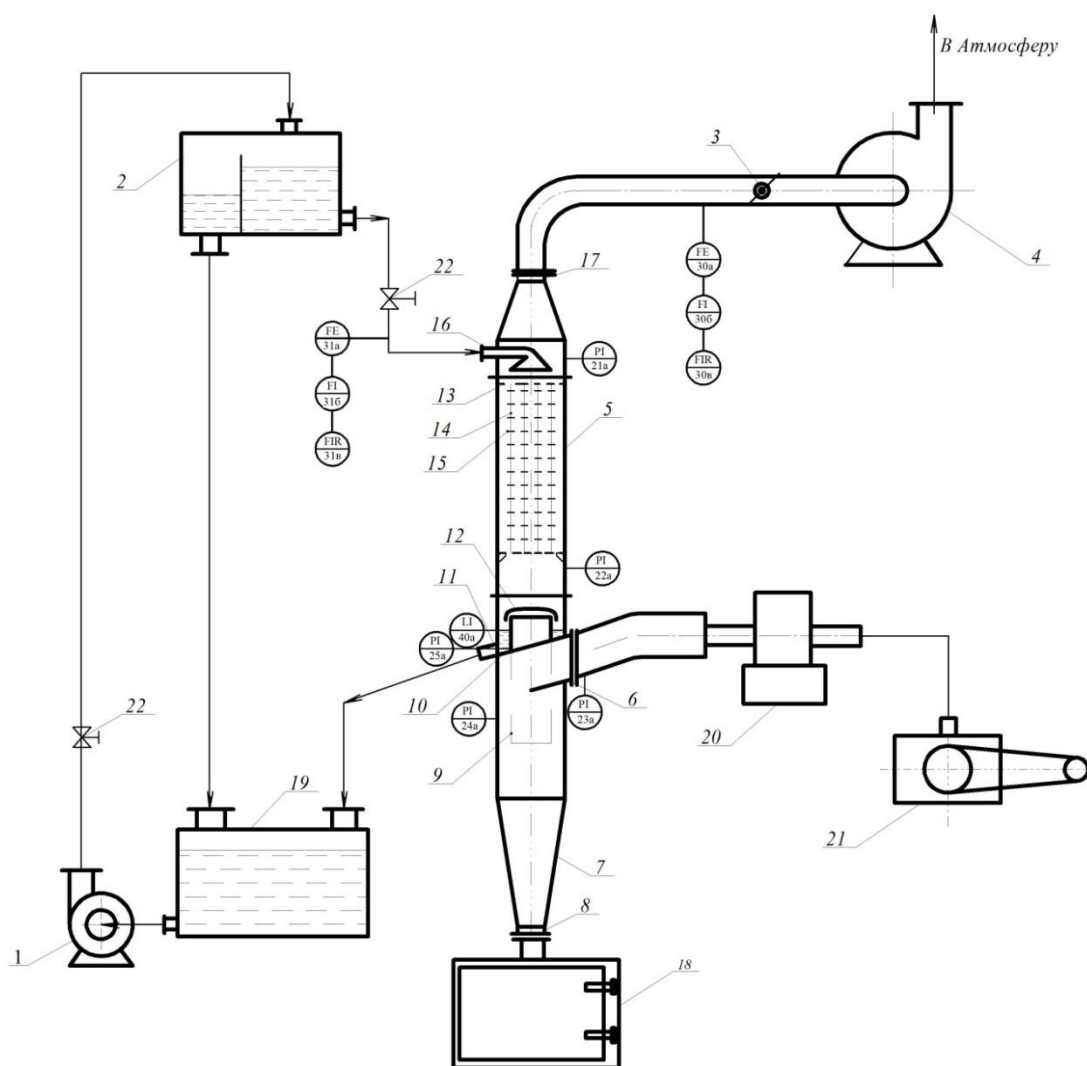
### **2.3 Технологическая схема экспериментальной установки с аппаратом, использующим центробежный механизм взаимодействия потоков**

На рисунке 2.3 приведена схема экспериментальной установки для исследования гидродинамических характеристик и параметров пылеулавливания с аппаратом циклонно-вихревого действия [23].

Поток воздуха поступает в нижнюю ступень циклонно-вихревого аппарата через патрубок 6, установленный тангенциально и под углом к корпусу 5. Возникающая при этом центробежная сила воздействует на твердые частицы пыли, прижимая их к внутренней стенке аппарата. Под действием силы тяжести твердые частицы пыли сползают в коническое днище 7 нижней ступени контакта и выводятся из аппарата через «мигалку» и нижний патрубок 8 в емкость для сбора пыли 18.

Очищенный от пыли газовый поток через нижний срез центральной трубы 9 поступает в верхнюю ступень контакта. При входе в нее центральная труба снабжена колпаком 12 для исключения попадания стекающей орошающей жидкости.

Нижняя и верхняя ступени контакта разделены наклонной перегородкой 10, вследствие чего работа их происходит автономно.



1 – насос; 2 – напорная емкость; 3 – шибер; 4 – вентилятор; 5 – аппарат циклонно-вихревого действия; 6 – патрубок для подвода газа; 7 – коническое днище; 8 – пылевыпускной патрубок с «мигалкой»; 9 – центральная труба; 10 – наклонная перегородка; 11 – штуцер для слива жидкости; 12 – колпак; 13 – опорно-распределительная решетка; 14 – струны; 15 – насадочные элементы; 16 – ороситель; 17 – патрубок для выхода газа; 18 - емкость для сбора пыли; 19 – циркуляционная емкость; 20 – пылеподатчик; 21 – компрессор; 22 - вентиль.

Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной установки с аппаратом циклонно-вихревого действия

Работа верхней ступени контакта осуществляется в противоточном режиме. Движение газа происходит снизу вверх, а орошающей жидкости сверху вниз. Жидкость из циркуляционной емкости 19 насосом 1 подается напорную емкость 2, откуда она через ороситель 16, расположенный над рабочей зоной поступает в зону контакта. Расход воды регулируется вентилем 22 по показаниям ротаметра. После взаимодействия с газовым потоком жидкость через штуцер 11 в нижней части верхней ступени контакта стекает в циркуляционную емкость 19, а газ

через верхний патрубок 17 аппарата отсасывается по газоходу вентилятором 4 и выбрасывается в атмосферу. Расход воздушного потока регулируется шибером 3 по показаниям стандартной диафрагмы с дифманометром.

В контактной зоне верхней ступени на струнах 14 натянутых между опорно-распределительными решетками 13, с определенным шагом закреплены насадочные элементы 15, представляющие собой пластины 40x40x1 мм.

Для распыления порошков в подводящем газоходе использовали пылеподатчик ЛИОТ 20 в комплекте с компрессором 21. Пылеподатчик ЛИОТ обладает высокой дезинтеграцией частиц и возможностью регулирования производительностью в зависимости от расхода газа [45,46].

Диапазон изменения режимных параметров:

- скорость газа  $W_r = 1 \div 5$  м/с в вихревой ступени, что соответствует скорости газа на входе в циклонную ступень  $W_{вх} = 4,575 \div 22,875$  м/с;
- плотность орошения  $L = 25 \div 100$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч.

## 2.4 Методики проведения исследований

### 2.4.1 Методики исследования гидродинамических характеристик

*Гидравлическое сопротивление* измерялось дифференциальным манометром и проверялось наклонным микроманометром.

Исследование *количества удерживаемой насадкой жидкости* проводилось методом «отсечки» при одновременном закрытии шибера на газовом тракте и вентиля на линии подачи воды и с последующим измерением объема стекающей жидкости мерной емкостью [47].

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

*Статический и динамический уровни жидкости* определялись с помощью линейки, закрепленной на корпусе аппарата.

### 2.4.2 Методики исследований коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи

Для проведения исследований *коэффициентов массоотдачи в газовой фазе* установка была укомплектована ртутными термометрами и психрометрами Ассмана с ценой деления 0,1<sup>0</sup>С.

Для определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе, отнесенных к сечению аппарата  $\beta_{rs}$  или к его объему  $\beta_{rv}$ , использовали широко применяемую методику, основанную на изучении процесса адиабатического испарения воды в воздух [48,49].

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

$$\beta_{rs} = \frac{W_r \cdot \gamma_g \cdot \Delta x \cdot R \cdot T_k \cdot P_0}{M_{H_2O} \cdot \Delta P_{cp}} \quad (2.1)$$

и

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

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

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{к}} - P_{\text{н}}}{\ln \frac{P^* - P_{\text{н}}}{P^* - P_{\text{к}}}} \quad (2.3)$$

В уравнениях (2.1)÷(2.3):  $\gamma_{\text{Г}}$  – удельный вес воздуха, Н/м<sup>3</sup>;  $\Delta x = x_{\text{к}} - x_{\text{н}}$  – разность влагосодержаний, кг/кг;  $P_0$  – общее давление, определенное по барометру, Па;  $M_{\text{H}_2\text{O}}$  – молекулярный вес воды, кг/моль;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·град);  $T_{\text{к}}$  – температура, °К;  $P^*$  – равновесное давление водяных паров, Па;  $P_{\text{н}}$  и  $P_{\text{к}}$  – 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 [50,51], а также рассчитывали [52] по уравнениям:

$$x_{\text{н}} = 0,622 \cdot \frac{P_{\text{н}}}{P_0 - P_{\text{н}}}; \quad (2.4)$$

$$x_{\text{к}} = 0,622 \cdot \frac{P_{\text{к}}}{P_0 - P_{\text{к}}}. \quad (2.5)$$

Методика исследования *коэффициентов теплоотдачи*  $\alpha$  [53].

Средние значения  $\alpha$  по результатам опытов рассчитывались по формуле:

$$\alpha = \frac{G_{\text{г}} c_{\text{п}}^{\text{г}} (t_{\text{сн}} - t_{\text{ск}})}{F \cdot \Delta t_{\text{ср.л}}}, \quad (2.6)$$

где:  $G_{\text{г}}$  – массовый расход воздуха, кг/ч.;

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

$c_{\text{пв}}$  – теплоемкость влажного воздуха; кДж/(кг·К);

$F$  – поверхность контакта, м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{\text{ср.л}}$  – средняя логарифмическая разность температур, °С;

$$\Delta t_{\text{ср.л}} = \frac{\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{min}}}{\ln \frac{\theta_{\text{max}}}{\theta_{\text{min}}}}, \quad (2.7)$$

где  $\theta_{\text{max}}$  и  $\theta_{\text{min}}$  – соответственно наибольший и наименьший температурные напоры между потоками °С.

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

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

Температура воздуха по мокрому термометру измерялась психрометрическим методом, основанном на одновременном измерении температуры сухим и влажным (мокрым) термометрами. Измерения производились психрометрами Асмана снабженных ртутными термометрами с ценой деления  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

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

Коэффициент массоотдачи в газовой фазе  $\beta_{ds}$  определяли по формуле (2.9):

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

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

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

$$d = 0.622 \frac{p_n}{(P_0 - p_n)}, \quad (2.10)$$

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

$P_0$  – барометрическое давление, мм. рт. ст.

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



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

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

$A_n$  – психрометрический коэффициент.

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

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

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

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

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

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

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

$\Delta p_1$  – поправка на температуру воздуха, берется по специальным таблицам;

$\Delta p_2$  – поправка на высоту места измерения (по специальным таблицам);

$\Delta p_3$  – инструментальная поправка (по паспорту прибора).

### **2.4.3 Методики исследований эффективности процесса пылеулавливания**

Для распыления порошков в подводящем газоходе использовали пылеподатчик ЛИОТ, который хорошо зарекомендовал себя надежностью в эксплуатации, высокой дезинтеграцией частиц, возможностью регулирования производительностью в зависимости от расхода газа, подаваемого в аппарат. Кроме того, он рекомендован для проведения сопоставительной оценки мокрых пылеуловителей [45,46].

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

потоке газа вместо аллонжей использовали семиступенчатый импактор со сдвоенными ступенями [54,55].

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

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

Для определения дисперсности пылей использовали два метода. Контроль помола пыли проводили методом седиментационного анализа на приборе с подъемной пипеткой [56,57]. Дисперсный состав пыли в потоке газа до и после аппарата определяли с помощью малогабаритного семиступенчатого импактора со сдвоенными ступенями.

*Определение общей эффективности пылеулавливания.* В проводимых экспериментах использовали метод внутренней фильтрации с аллонжами.

Запыленность потока ( $\text{г}/\text{нм}^3$ ) определяли по уравнению

$$Z = \frac{q}{g_0 \cdot \tau}, \quad (2.15)$$

где  $q$  – привес пыли в аллонже, г;  $g_0$  – объемная скорость газа при отборе, приведенная к нормальным условиям,  $\text{нм}^3/\text{с}$ ;  $\tau$  – продолжительность отбора, с.

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

$$Z_H = \frac{m}{g_r \cdot \tau_{on}}, \quad (2.16)$$

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

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

$$\eta_{общ} = \frac{Z_H - Z_K}{Z_H} \cdot 100 \quad (2.17)$$

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

*Определение фракционной эффективности пылеулавливания.* Для замера дисперсного состава пыли на входе и выходе пылеуловителя применяли схему, в которой использовался импактор.

Для построения кривой дисперсного состава относительную долю частиц (%), осевших на первой ступени рассчитывали по формуле:

$$f_{1,1} = \frac{q_{1,1}}{q_{1,1} + q_{1,2} + q_{2,1} + q_{2,2} + q_{3,1} + q_{3,2} + \dots q_{\text{TM}}} \cdot 100, \quad (2.18)$$

где  $q_{1,1}, q_{1,2}, \dots$  – привес соответствующих ступеней импактора, кг;  $q_{\phi}$  – привес фильтра, кг.

Тогда для частиц, осевших на первой и второй ступени импактора составит:

$$f_{1,1,1.2} = \frac{q_{1,1} + q_{1,2}}{q_{1,1} + q_{1,2} + q_{2,1} + q_{2,2} + q_{3,1} + q_{3,2} + \dots q_{\text{TM}}} \cdot 100 \quad (2.19)$$

Коэффициент фракционной очистки  $\eta_{\phi}$  (%) определяли по уравнению:

$$\eta_{\phi} = \frac{\Phi'_i - \Phi''_i(1 - \eta_{\text{общ}})}{\Phi'_i} \quad (2.20)$$

где  $\Phi'_i, \Phi''_i$  – содержание  $i$  - фракции на входе и выходе из аппарата, %.

### **3 ГИДРОДИНАМИКА, МАССООБМЕН И ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ ДВУХЗОННОГО АППАРАТА С РЕГУЛЯРНО РАЗМЕЩЕННОЙ НАСАДКОЙ И ДВУХСТОРОННИМ ПОДВОДОМ ГАЗОВОГО ПОТОКА**

#### **3.1 Конструкция одноступенчатого двухзонного аппарата с регулярно размещенной насадкой и двухсторонним подводом газового потока**

В отличие от одноступенчатого двухзонного аппарата с регулярно размещенной насадкой и односторонним подводом газового потока конструкция аппарата с двухсторонним подводом газа через патрубки, расположенные на противоположных сторонах корпуса аппарата позволяет решить проблемы неравномерности газожидкостного слоя по высоте и его раскачке.

На рисунке 3.1 представлена конструкция аппарата инерционно-турбулентного действия с двухсторонним подводом газового потока [21].

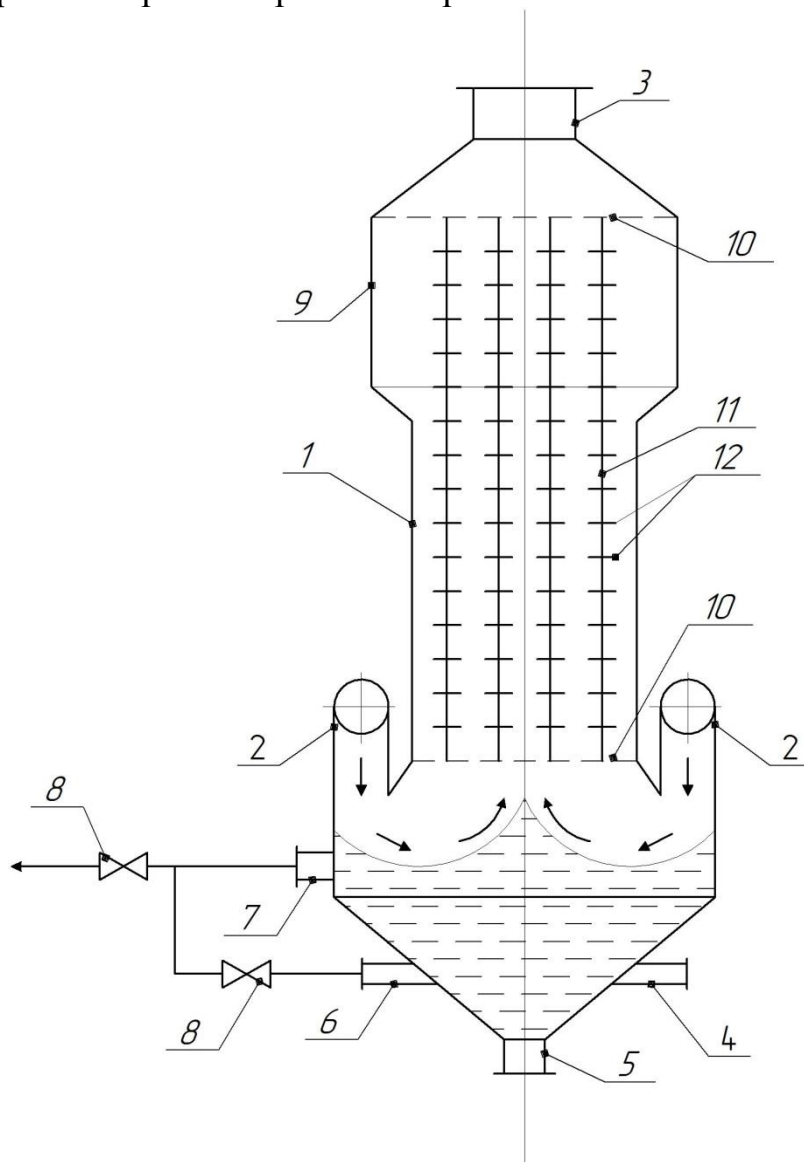
Во время работы аппарата газовый поток, поступающий на очистку, подается в штуцера 2, расположенные с внешней стороны корпуса аппарата друг напротив друга. Разделенный на две части газовый поток с высокой скоростью ударяется о поверхность жидкости. Отношение диаметров входных газовых штуцеров к диаметру контактной зоны составляет 0,15-0,35, что обеспечивает достижение скорости газа в трубке свыше 10 м/с. Этой скорости достаточно для эффективного ударного взаимодействия газового потока с покоящейся жидкостью. При ударе содержащиеся в газовом потоке твердые частицы за счет сил инерции осаждаются в жидкости. В виду того, что разделенные потоки газа имеют равную силу, подхваченная ими жидкость в виде пленок и капель эжектируется в насадочную зону аппарата в центральной его части. Этим самым обеспечивается равномерная подача жидкости в контактную зону аппарата.

В насадочной зоне аппарата регулярно размещены на струнах 11 насадочные тела 12. При обтекании газожидкостным потоком насадочных тел возникает синфазный режим, который характеризуется ростом суммарной мощности вихрей, создающими высокотурбулизованный газожидкостной поток. Это способствует достижению высокой эффективности проведения процессов тепломассообмена или пылеулавливания.

Так как отношение диаметра сепарационного пространства к диаметру контактной зоны составляет 1,5-2, то пройдя контактную зону аппарата, и достигнув сепарационного пространства, газовый поток значительно теряет свою скорость. Указанный диапазон соотношений обеспечивает снижение скорости газа до 2 м/с, при которой скорость движения капель стремится к нулю и за счет сил инерции капли возвращаются в контактную зону. Увеличению эффективности сепарации способствует насадка, выполняющая роль отбойников и располагающаяся в сепарационном пространстве, высота которого составляет 0,5 высоты контактной зоны.

Очищенный газовый поток выводится из аппарата через штуцер 3. В нижней части аппарата предусмотрена подача свежей жидкости через патрубков 4 и вывод шлама через патрубков 5. Жидкость в нижней части аппарата может находиться в

режиме циркуляции при закрытом верхнем вентиле 8, а при закрытом нижнем вентиле и открытом верхнем в режиме перелива.



1 – корпус; 2 – штуцер для ввода газа; 3 – штуцер для вывода газа; 4 - патрубок для ввода свежей жидкости; 5 - патрубок вывода шлама; 6 - штуцер для рециркулирующего раствора; 7 – штуцер для перелива жидкости; 8 – вентили; 9 – сепарационное пространство; 10 - опорно-распределительные решетки; 11 – струны; 12 – насадочные элементы.

Рисунок 3.1 - Аппарат инерционно-турбулентного действия с двухсторонним подводом газового потока

### 3.2 Гидродинамические закономерности

Анализ литературных источников по конструкциям оборудования реализующего ударно-инерционное взаимодействие потоков (гидродинамический пылеуловитель, газопромыватель ударного действия, скрубберы Дойля, скрубберы ударного действия, ротоклоны типа N и РПА, пылеуловитель вентиляционный мокрый и гидродинамический пылеуловитель)

показал, что в них не приводятся детальных данных по гидродинамике процесса ударного взаимодействия газа с поверхностью жидкости. Однако, гидродинамика этого процесса имеет важное значение для выяснения основных механизмов осаждения аэрозолей в зоне взаимодействия газа и жидкости и разработки методов расчета.

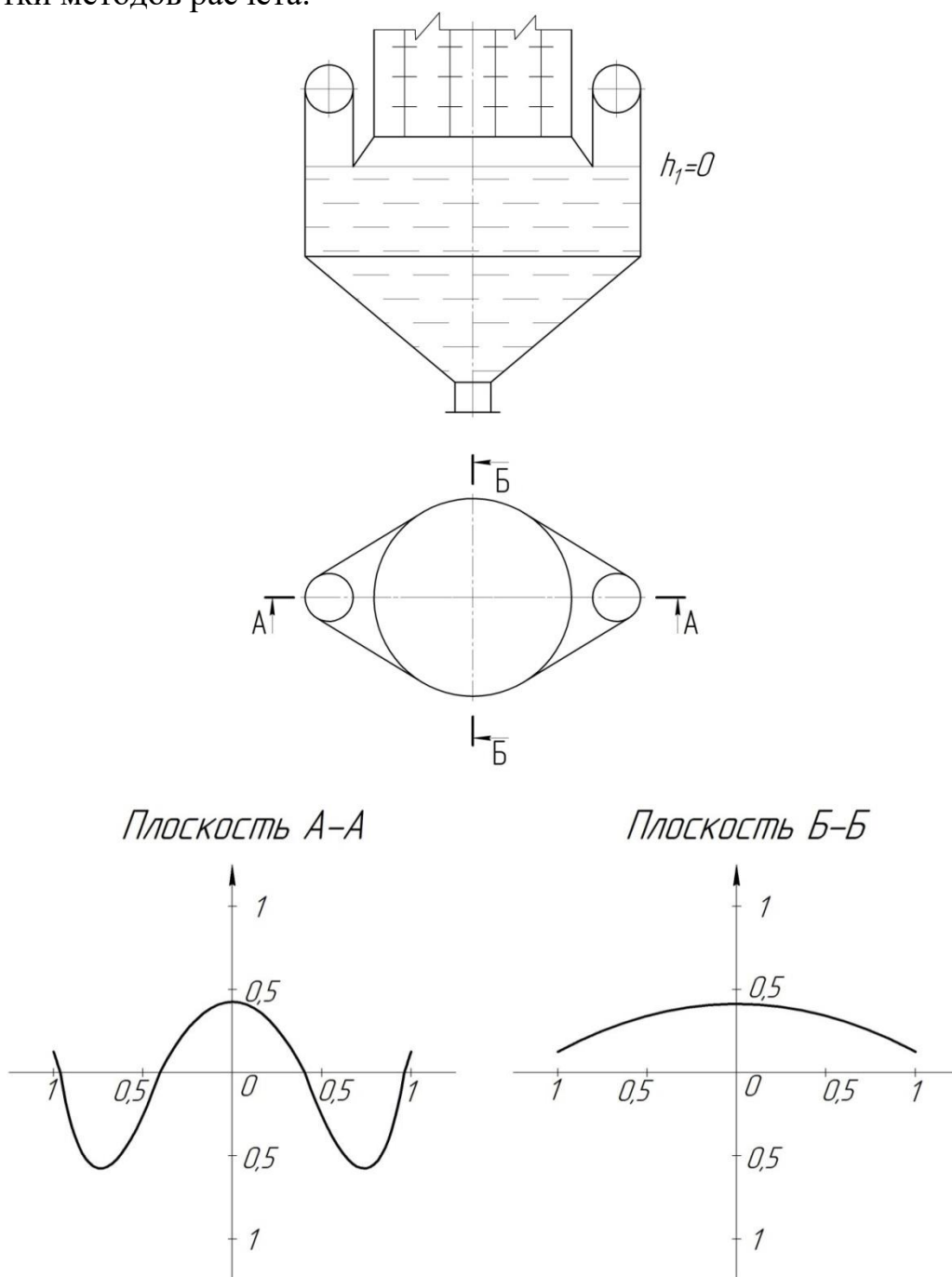


Рисунок 3.2 - Относительный размер глубины воронки и высоты жидкостного «холма».

Визуальные наблюдения и фотосъемка показывают следующую картину образования жидкостной воронки (рисунки 3.2 и 3.3). Газовый поток, поступающий на очистку, подается в штуцера, расположенные с внешней стороны корпуса аппарата друг напротив друга. Разделенный на две части газовый поток с высокой скоростью (свыше 10 м/с) ударяется о поверхность

жидкости. Этой скорости достаточно для эффективного ударного взаимодействия газового потока с покоящейся жидкостью. При ударе содержащиеся в газовом потоке твердые частицы за счет сил инерции осаждаются в жидкости. В виду того, что разделенные потоки газа имеют равную силу, подхваченная ими жидкость в виде пленок и капель эжектируется в насадочную зону аппарата в центральной его части. Этим самым обеспечивается равномерная подача жидкости в контактную зону аппарата [58].

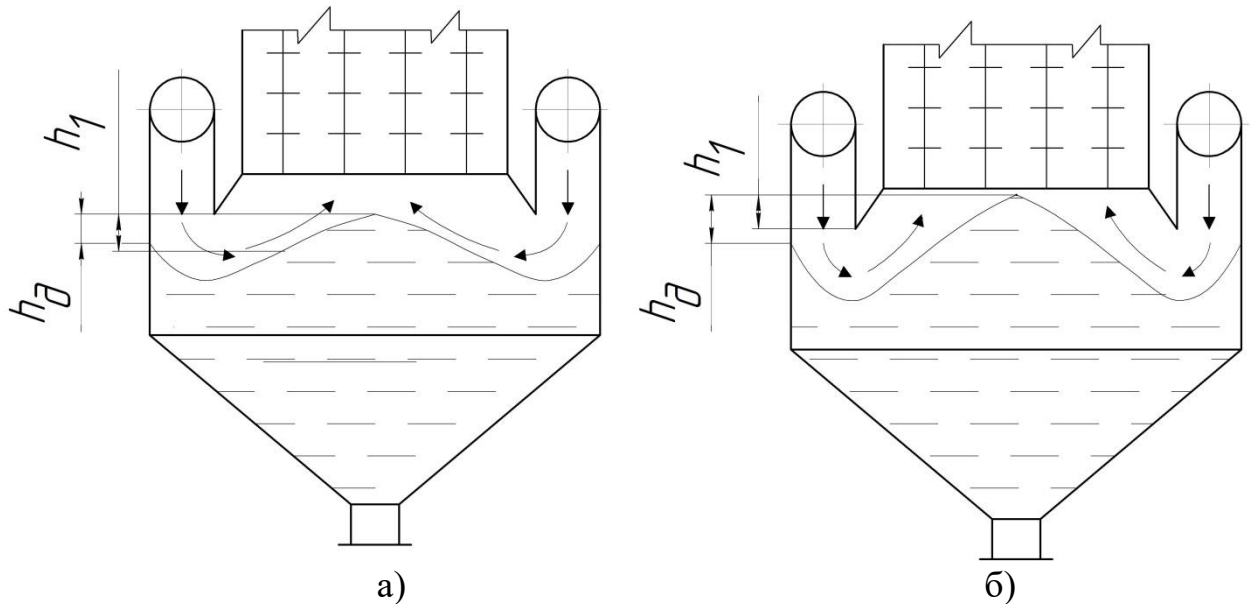
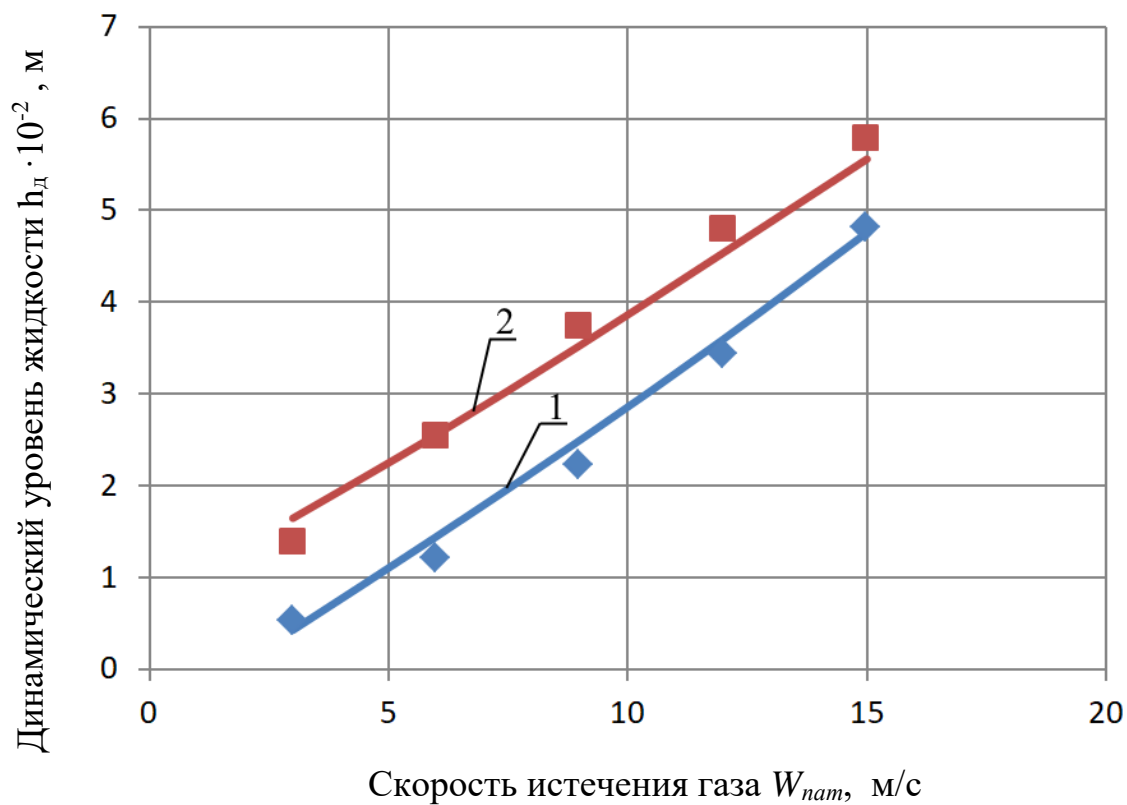


Рисунок 3.3 - Взаимодействие газовой и жидкой фаз в эжекционной зоне аппарата ударно-вихревого действия при различных исходных уровнях жидкости

Как известно, ударное взаимодействие газа и жидкости приводит к образованию жидкостной воронки. Характерными размерами жидкостной воронки являются – глубина и диаметр воронки. Глубина воронки (углубление от среза патрубка до дна воронки) является составной частью динамического уровня жидкости.

На рисунках 3.4 и 3.5 представлены экспериментальные кривые зависимостей динамического уровня жидкости и диаметра жидкостной воронки от скорости истечения газа [59, 60].

Как видно из рисунков увеличение скорости истечения газового потока из патрубка ведет к интенсивному росту как  $h_0$ , так и  $D_0$ . Рост динамического напора для аппарата с двухсторонним подводом газового потока больше, чем для аппарата с односторонним подводом. При малых значениях скорости газового потока ( $W_{nam} < 4 \text{ м/с}$ ) жидкостной воронки практически не образуется, тогда, как при  $W_{nam} > 4 \text{ м/с}$  наблюдается интенсивный рост  $h_0$ .



1 и 2 -  $h_d$  аппарата с односторонним и двухсторонним подводом газового потока, соответственно.

Рисунок 3.4 – Зависимость изменения динамического уровня жидкости  $h_d$  от скорости истечения газа  $W_{nam}$

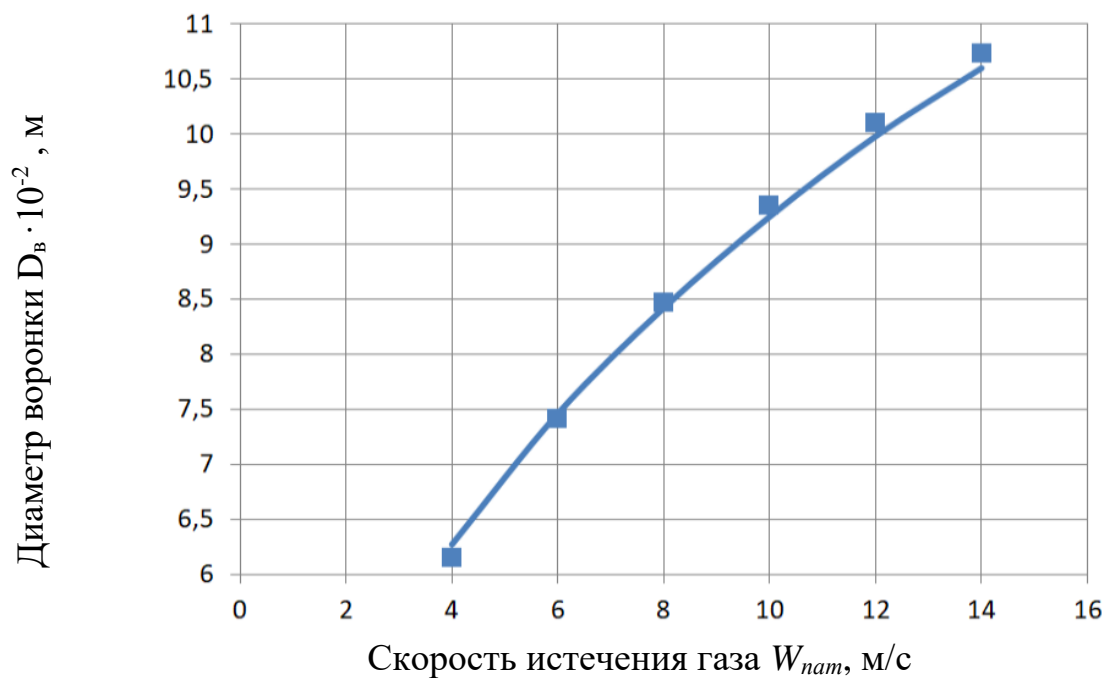
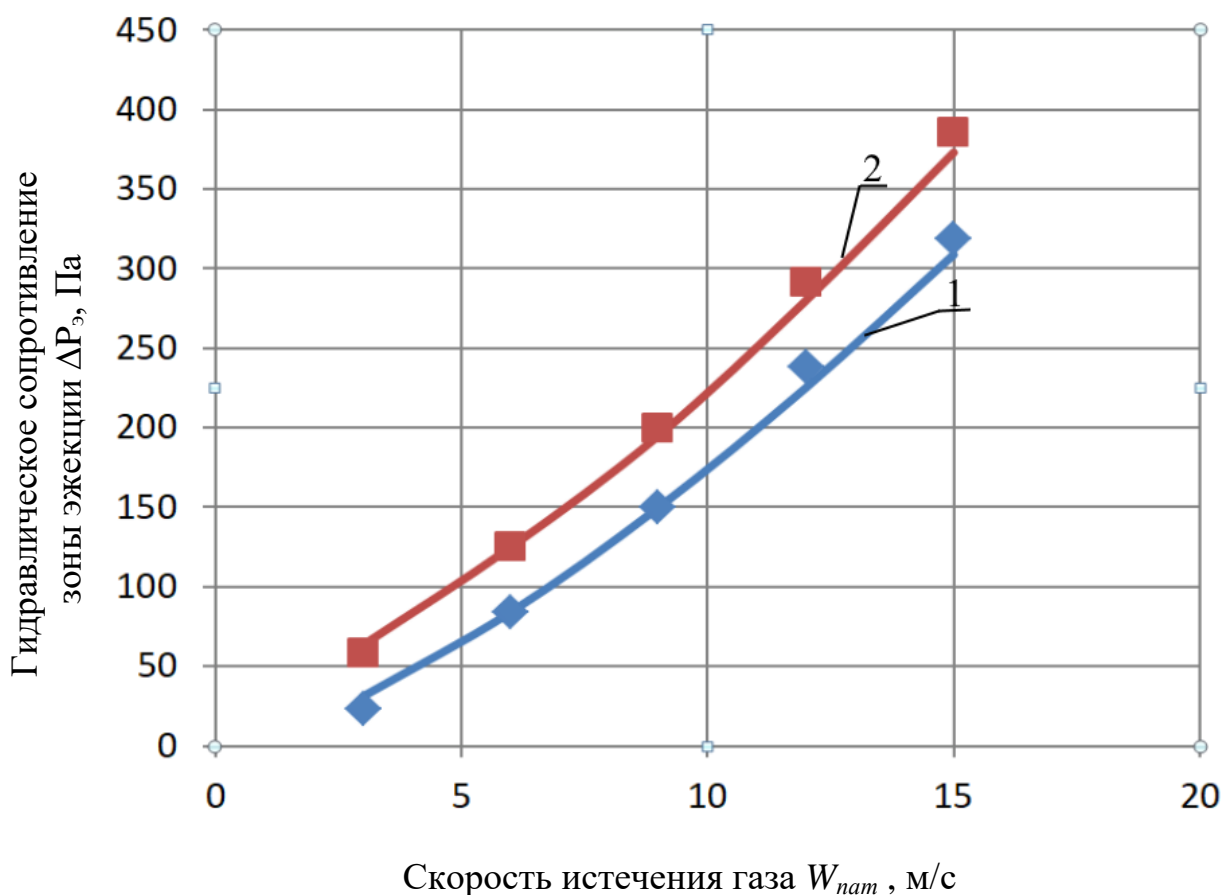


Рисунок 3.5 – Зависимость изменения диаметра воронки  $D_v$  от скорости истечения газа  $W_{nam}$  в аппарате с двухсторонним подводом газового потока



Рост диаметра воронки (рисунок 3.5) обусловлен увеличением динамического напора газового потока, приводящего к увеличению глубины воронки и вытеснением большего количества жидкости.

На рисунке 3.6 представлен график зависимости расчетных и экспериментальных данных изменения гидравлического сопротивления зоны эжекции от скорости газа в патрубке.



Условия опытов:  $h_1=0$  м.  
 1 и 2 -  $\Delta P_z$  аппарата с односторонним и двухсторонним подводом газового потока, соответственно.

Рисунок 3.6 – Зависимость изменения гидравлического сопротивления зоны эжекции  $\Delta P_z$  от скорости истечения газа  $W_{nam}$

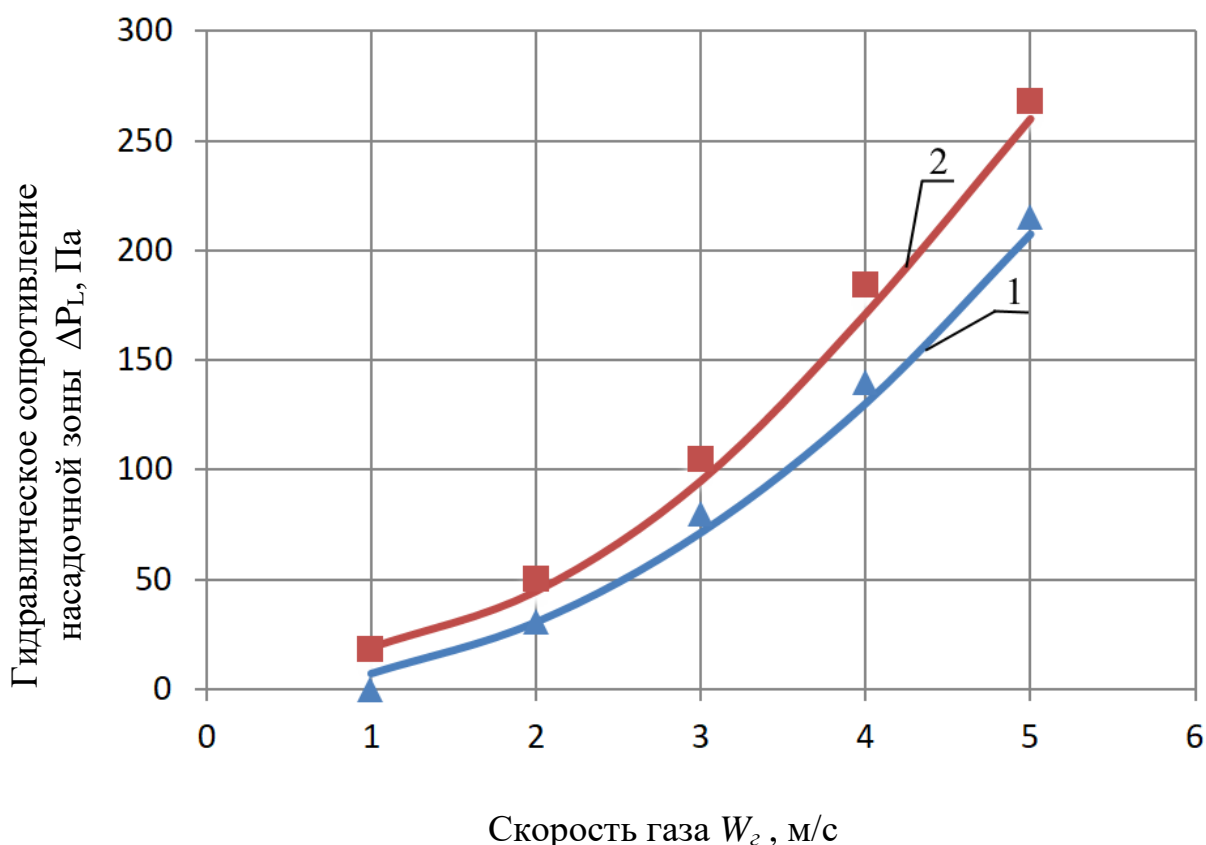
Из графика видно, что гидравлическое сопротивление зоны эжекции с ростом скорости газа в патрубке увеличивается практически по линейной зависимости и зависит главным образом от потерь скоростного напора. Рост гидравлического сопротивления зоны эжекции для аппарата с двухсторонним подводом газового потока больше, чем для аппарата с односторонним подводом. Это связано с тем, что в аппарате с двухсторонним подводом газового потока эжектируется большее количество жидкости в насадочную зону, следовательно энергетические затраты больше.

В насадочной зоне аппарата инерционно-турбулентного действия с двухсторонним подводом газового потока реализуется вихревое взаимодействие потоков газа и жидкости [59, 60].

Анализ собственных экспериментальных данных гидравлического сопротивления насадочной зоны аппарата  $\Delta P_L$  в зависимости от скорости газа  $W_G$  при различных исходных уровнях жидкости  $h_1$ , а также 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 [28 с.130].

Исходный уровень жидкости  $h_1$  в значительной степени обуславливает границы существования режимов и величину гидравлического сопротивления.

На рисунке 3.7 приведен график зависимости  $\Delta P_L=f(w_2)$ .



Условия опытов:  $t_b/b=2$ ;  $t_p/b=2$ ;  $h_1=0$  м;  $b \times b = 40 \times 40$  мм  
 1 и 2 -  $\Delta P_L$  аппарата с односторонним и двухсторонним подводом газового потока, соответственно.

Рисунок 3.7 - Зависимость гидравлического сопротивления насадочной зоны  $\Delta P_L$  газоочистного аппарата от скорости газа  $W_G$

Изменение исходного уровня жидкости  $h_1$  от -0,02 до +0,03 м сдвигает начало капельного режима в сторону меньших скоростей.

При скорости газа  $W_{\Gamma} \approx 4$  м/с в полной мере реализуется механизм вихревого дробления жидкости в насадочной зоне аппарата. Возрастает турбулентность слоя, улучшается однородность распределения потоков по поперечному сечению аппарата.

Величина исходного уровня жидкости  $h_1$  оказывает значительное влияние на границы существования капельного режима и структуру газожидкостного слоя в зоне эжекции. При  $h_1 > 0$  влияние скорости газа на гидравлическое сопротивление сильнее, чем при  $h_1 \leq 0$ . В размерах капель при  $h_1 < 0$  преобладают более тонкие фракции (0,8÷1,2 мм), а при  $h_1 > 0$  размер эжектируемых капель крупнее (2,0-2,5 мм).

Режим брызгоуноса наступает при скорости газового потока свыше 4 м/с и характеризуется значительным ростом гидравлического сопротивления. Происходит значительное накопление жидкости в насадочной зоне и над ней. Кинетическая энергия газового потока достаточна для интенсивного уноса жидкости из аппарата.

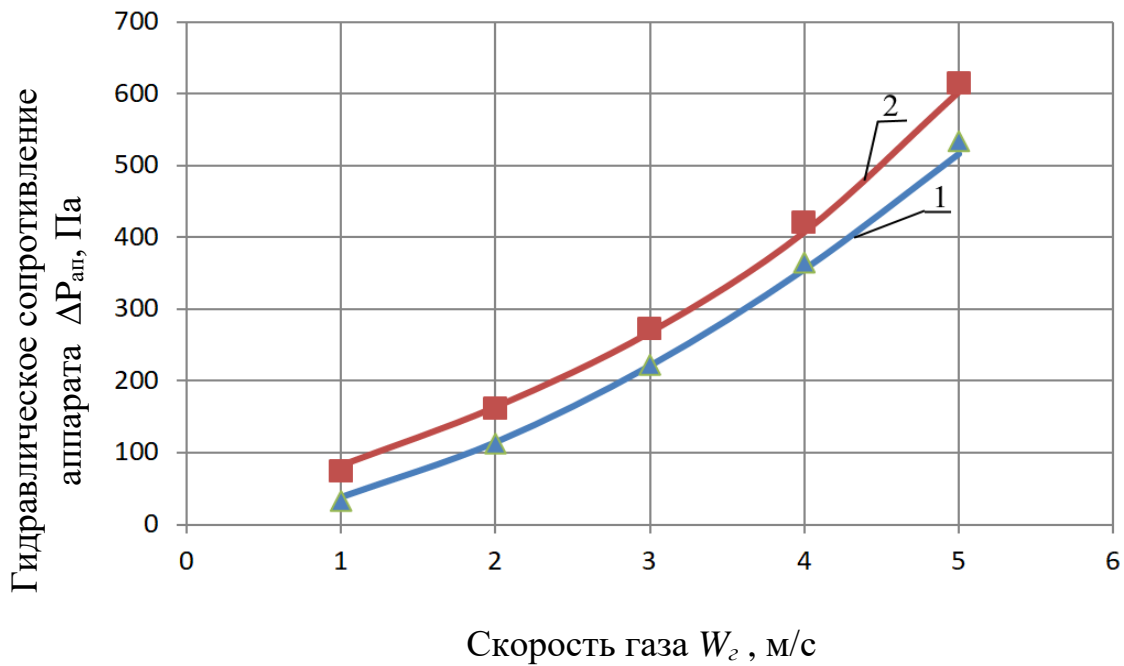
Величина исходного уровня жидкости  $h_1$  при положительных значениях ускоряет наступление режима уноса, тогда как отрицательные значения  $h_1$  приводят к тому, что этот режим наступает при  $W_{\Gamma} > 4,5$  м/с.

На рисунках 3.8 и 3.9 представлены графики зависимостей гидравлического сопротивления  $\Delta P_{an}$ , а на рисунках 3.10 и 3.11 количества удерживаемой жидкости  $h_0$  и газосодержания слоя  $\varphi$  аппаратов с односторонним и двухсторонним подводом газового потока от скорости газа  $W_{\Gamma}$  и от исходного уровня жидкости  $h_1$ .

Как видно из рисунков 3.8 и 3.10 с увеличением скорости газового потока гидравлическое сопротивление и количество удерживаемой жидкости аппаратов с односторонним и двухсторонним подводом газового потока растут. Известно, что рост гидравлического сопротивления при увеличении скорости газа обусловлен ростом динамического напора. В связи с этим растут энергетические затраты на преодоление контактной зоны аппаратов. Увеличение динамического напора также способствует удержанию большего количества жидкости в объеме насадки (рисунок 3.10).

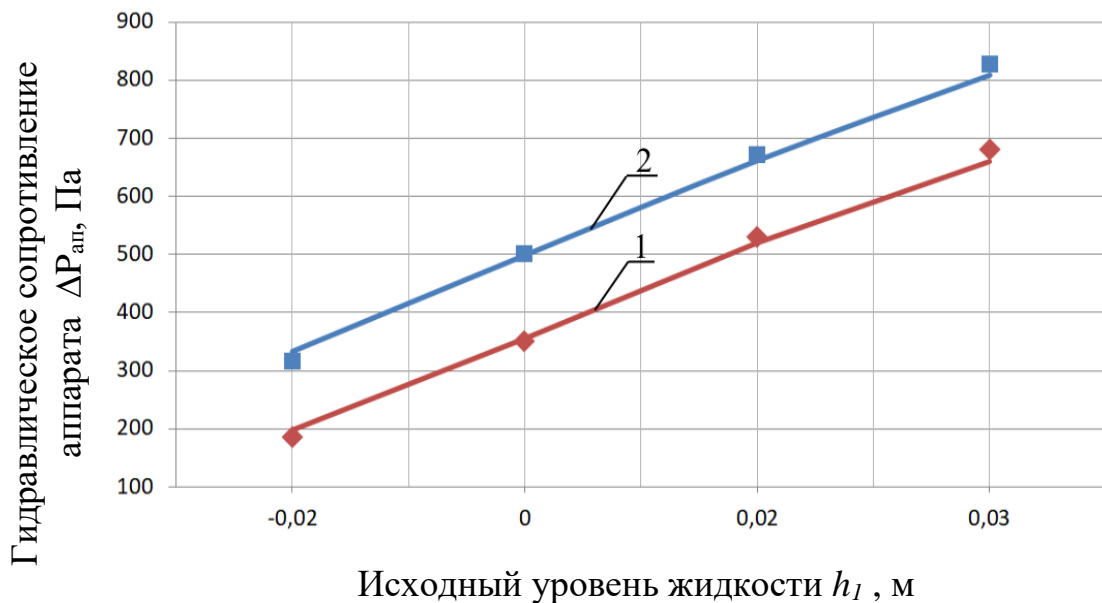
Расчетные данные по газосодержанию слоя (рисунок 3.10) показывают, что с увеличением скорости газа значения газосодержания слоя снижаются, что связано большим количеством удерживаемой жидкости.

Увеличение исходного уровня жидкости (рисунки 3.9 и 3.11) приводит к росту гидравлического сопротивления и количества удерживаемой жидкости. Это очевидно, так как в процессе перемешивания участвует большее количество жидкости.



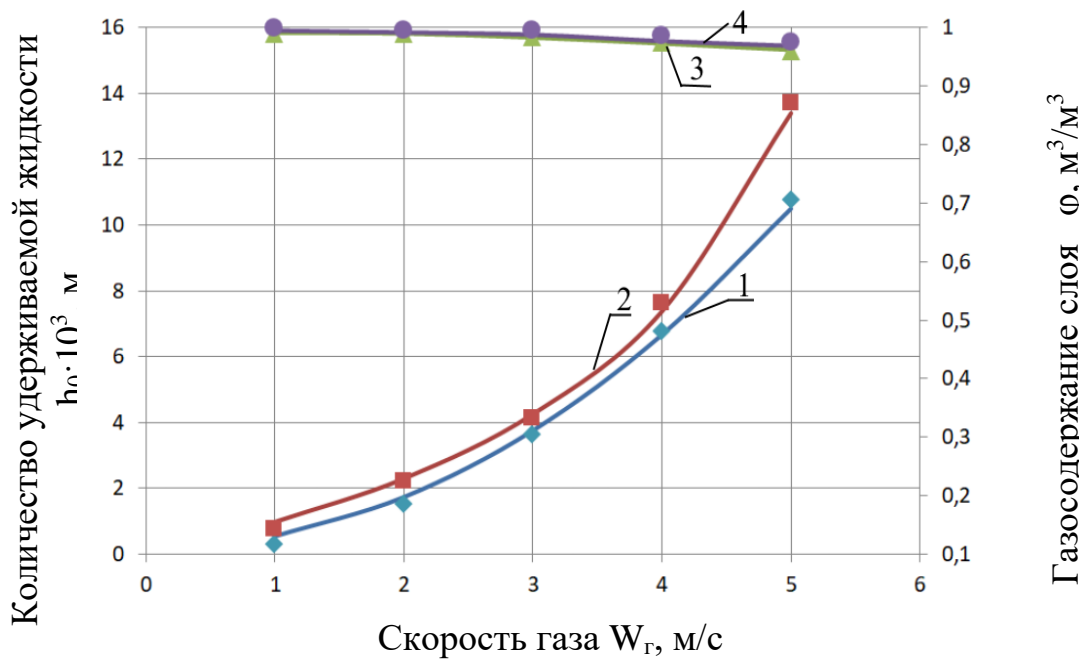
Условия опытов см. рисунок 3.7.  $h_l=0$  м  
 1 и 2 -  $\Delta P_{ап}$  аппаратов с односторонним и двухсторонним подводом газового потока, соответственно.

Рисунок 3.8 - Зависимость гидравлического сопротивления газоочистного аппарата  $\Delta P_{ап}$  от скорости газа  $W_{г}$



Условия опытов см. рисунок 3.7.  $W_{г}=4$  м/с  
 1 и 2 -  $\Delta P_{ап}$  аппаратов с односторонним и двухсторонним подводом газового потока, соответственно.

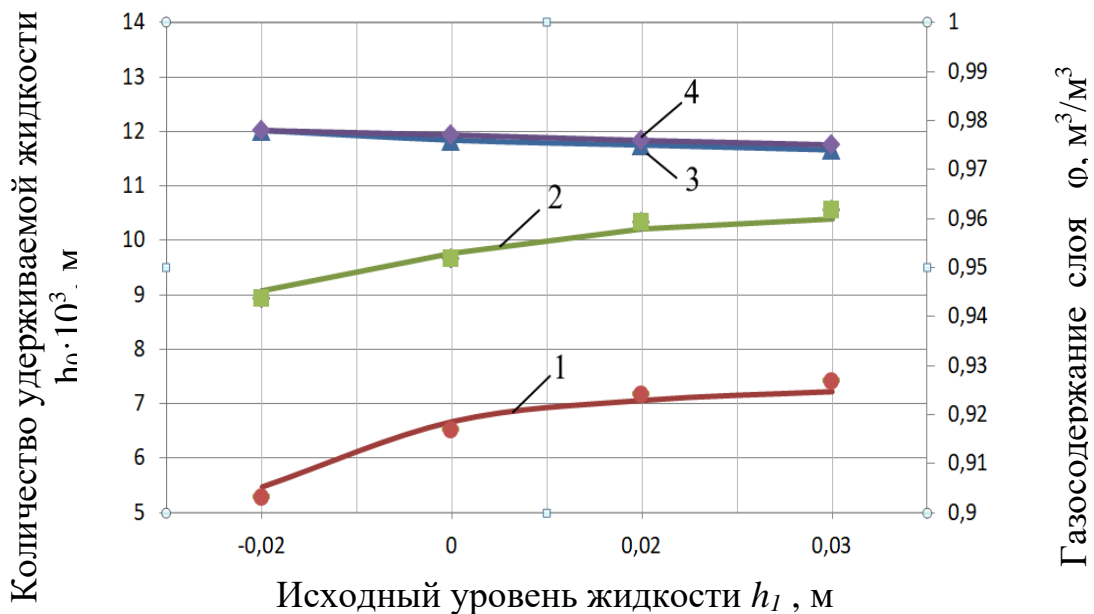
Рисунок 3.9 - Зависимость гидравлического сопротивления газоочистного аппарата  $\Delta P_{ап}$  от исходного уровня жидкости  $h_l$



Условия опытов см. рисунок 3.7.  $h_l=0$  м

1 и 3 -  $h_0$  и  $\varphi$  - аппарата с односторонним подводом газа; 2 и 4 -  $h_0$  и  $\varphi$  - аппарата с двухсторонним подводом газа

Рисунок 3.10 - Зависимость количества удерживаемой жидкости  $h_0$  и газосодержания слоя  $\varphi$  газоочистного аппарата от скорости газа  $W_{\Gamma}$



Условия опытов см. рисунок 3.7  $W_{\Gamma}=4$  м/с

1 и 3 -  $h_0$  и  $\varphi$  - аппарата с односторонним подводом газа; 2 и 4 -  $h_0$  и  $\varphi$  - аппарата с двухсторонним подводом газа

Рисунок 3.11 - Зависимость количества удерживаемой жидкости  $h_1$  и газосодержания слоя  $\varphi$  газоочистного аппарата  $\Delta P_{an}$  от исходного уровня жидкости  $h_1$

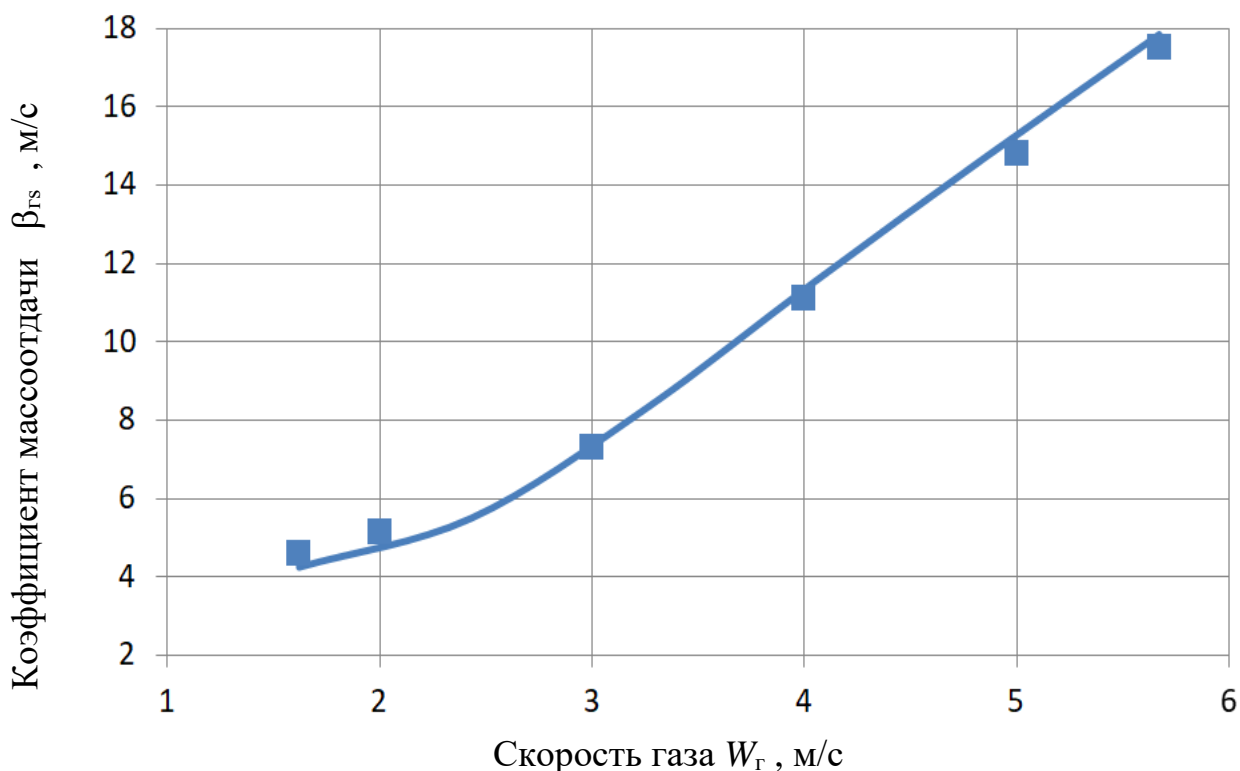
### 3.3 Массообменные характеристики и параметры пылеулавливания

В двухзонном аппарате с регулярно размещенной насадкой и двухсторонним подводом газового потока возможно одновременное проведение процессов абсорбции и пылеулавливания. Для изучения абсорбции хорошо растворимых газов в лабораторных условиях используют методику исследования адиабатического испарения воды в воздух с получением коэффициентов массоотдачи в газовой фазе.

Нами проведены исследования коэффициентов **массоотдачи в газовой фазе** при изменении скорости газа и исходного уровня жидкости.

Известно, что использование регулярной насадки приводит организованному вихревому взаимодействию потоков газа и жидкости. Это способствует многократному дроблению капель, струй и пленок жидкости, создавая при этом развитую межфазную поверхность. Вихри, возникающие при обтекании насадочных элементов, вносят значительный вклад в пульсации газожидкостного слоя. Основным из факторов, влияющим на частоту пульсаций потока, является его скорость.

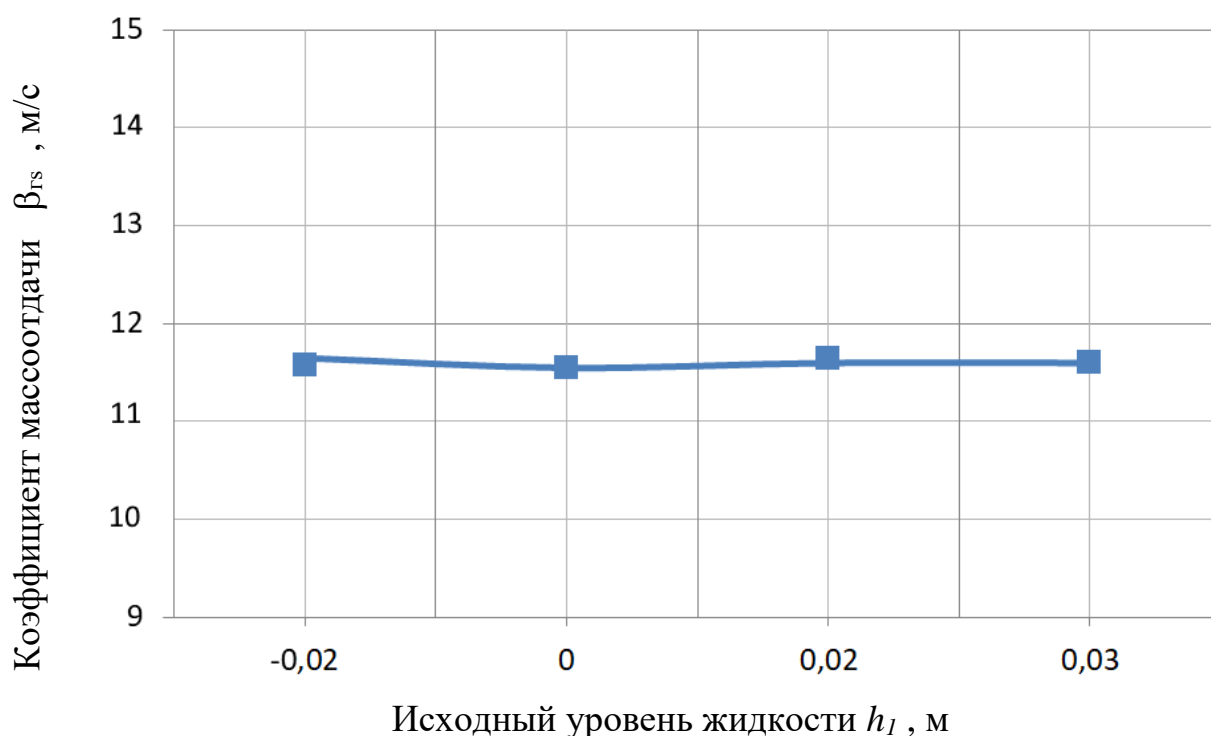
На рисунках 3.12 и 3.13 представлены графики зависимостей коэффициентов массоотдачи в газовой фазе при изменении скорости газа и исходного уровня жидкости.



Условия опытов см. рисунок 3.7.

Кривая –  $\beta_{гс}$  при  $h_1 = 0$  м

Рисунок 3.12- Зависимость коэффициентов массоотдачи в газовой фазе  $\beta_{гс}$  газоочистного аппарата от скорости газа  $W_{г}$



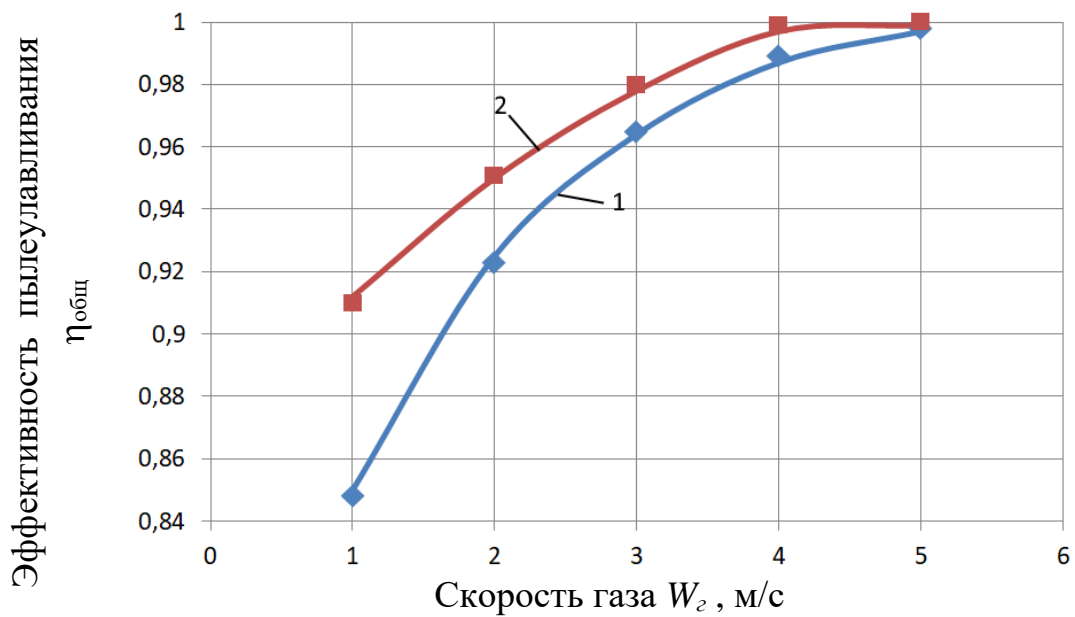
Условия опытов см. рисунок 3.7.  
Кривая –  $\beta_{gr}$  при  $W_{\Gamma} = 4$  м/с

Рисунок 3.13- Зависимость коэффициентов массоотдачи в газовой фазе  $\beta_{gr}$  газоочистного аппарата от исходного уровня жидкости  $h_1$

Анализ кривой на рисунке 3.12 показывает, что интенсивность массообмена растет с увеличением скорости газового потока. При проведении процесса массообмена лимитируемого сопротивлением газовой фазы, с увеличением скорости газа происходит значительная турбулизация потоков, что снижает диффузионное сопротивление. Структура газожидкостного слоя представляет собой капельную жидкость со сниженным средним диаметром капель. Наблюдается рост межфазной турбулентности. Это в большей степени проявляется в капельном режиме, где достигаются высокие значения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и допустимые значения брызгоуноса.

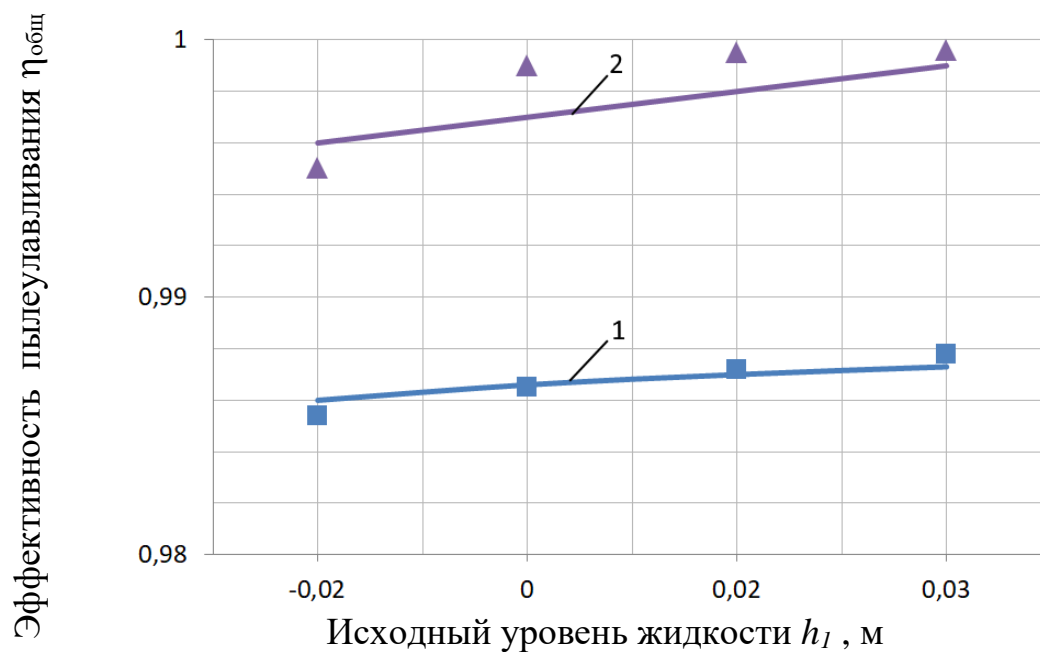
Значения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе с изменением исходного уровня жидкости от -0,02 до +0,03м (рисунок 3.13) несколько снижаются. Известно [47, 61], что увеличение притока жидкости при абсорбции хорошо растворимых газов незначительно влияет на эффективность и при повышенных значениях вызывает дополнительные расходы на перекачку жидкости.

Результаты исследований общей **эффективности пылеулавливания** аппарата ударно-вихревого действия в зависимости от скорости газового потока и исходного уровня жидкости представлены на рисунках 3.14 и 3.15 [62,63].



Условия опытов см. рисунок 3.7.  $h_1 = 0$  м;  $d_ч = 5$  мкм  
 1 и 2 –  $\eta_{общ}$  аппарата с односторонним и двухсторонним подводом газового потока, соответственно

Рисунок 3.14- Зависимость общей эффективности пылеулавливания  $\eta_{общ}$  газоочистного аппарата от скорости газа  $W_г$



Условия опытов см. рисунок 3.7.  $W_г = 4$  и  $5$  м/с;  $d_ч = 5$  мкм  
 1 и 2 –  $\eta_{общ}$  аппарата с односторонним и двухсторонним подводом газового потока, соответственно

Рисунок 3.15- Зависимость общей эффективности пылеулавливания  $\eta_{общ}$  газоочистного аппарата от исходного уровня жидкости  $h_1$



С увеличением скорости газового потока (рисунок 3.14) общая эффективность возрастает и достигает максимальных значений в капельном режиме, после чего дальнейшее увеличение скорости газа приводит к уносу жидкости из аппарата и эффективность процесса несколько снижается.

Высокие значения степени пылеулавливания обусловлены ростом количества эжектируемой жидкости и вихревым дроблением жидкости в насадочной зоне аппарата. Поскольку частота срыва вихрей с элементов насадки и, соответственно, интенсивность и частота пульсаций увеличиваются пропорционально скорости газа, то при неизменных параметрах насадки это приводит к интенсификации процесса срыва пленки жидкости и последующего ее дробления на более мелкие капли. При этом, естественно, увеличивается поверхность контакта фаз, а, в конечном счете, и общая эффективность пылеулавливания.

С увеличением исходного уровня жидкости (рисунок 3.14) рост общей эффективности пылеулавливания происходит пропорционально количеству эжектируемой в насадочную зону жидкости. При этом количество удерживаемой насадкой жидкости возрастает, увеличивается общее число дробимых капель, что способствует росту межфазной поверхности и степени пылеулавливания.

### 3.4 Методика расчета аппарата

**Гидравлическое сопротивление аппарата** рассчитывают по формуле (1.45):

$$\Delta P_{\text{ап}} = \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{Л}},$$

где  $\Delta P_{\text{э}}$  - гидравлическое сопротивление зоны эжекции, Па;  $\Delta P_{\text{Л}}$  - гидравлическое сопротивление насадочной зоны, Па.

Гидравлическое сопротивление зоны эжекции рассчитывают по уравнению (1.46) [28 с.127, 64-67]:

$$\Delta P_{\text{э}} = \lambda \frac{\rho_{\text{г}} \cdot W_{\text{пат}}^2}{2} + \rho_{\text{ж}} g [(1 - \varphi_{\text{э}}) h_{\text{о}}].$$

Для определения динамического уровня жидкости  $h_{\text{о}}$  предположим, что установившийся режим взаимодействия газовой струи, истекающей из патрубка со скоростью  $W_{\text{пат}}$ , с зеркалом жидкости является квазистатическим, то из основного уравнения гидростатики справедливо уравнение [20 с.45, 68-70]:

$$\Delta p = g (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}) h_{\text{о}} + \frac{4\sigma}{D_{\text{г}}}, \quad (3.1)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения;  $\rho_{ж}$  - плотность жидкости;  $\rho_2$  - плотность газа;  $h_0$  - общая высота перепада уровней жидкости;  $D_6$  - диаметр образуемой воронки;  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Первое слагаемое в правой части уравнения (3.1) учитывает затраты энергии газовой струи на изменение уровней перепада жидкости, а второе слагаемое затраты энергии на преодоление поверхностного натяжения жидкости при образовании воронки.

С другой стороны, барометрические параметры газового потока также претерпевают изменение. Во первых – направление движения газового потока меняется на противоположное, во вторых – за счет расширения сечения тракта движения потока происходит снижение его средней скорости движения. Все это создает обычное гидравлическое сопротивление. Тогда для перепада давлений в патрубке и эжекционной зоне справедливо выражение:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho_2 (W_{nam}^2 - W_{an}^2)}{2}, \quad (3.2)$$

в котором  $\zeta$  - коэффициент сопротивления;  $W_{an}, W_{nam}$  - осредненная скорость газового потока в патрубке и эжекционной зоне, соответственно.

Решая уравнения (3.1) и (3.2) относительно  $h_0$  и пренебрегая  $W_{an}$  и  $\rho_2$ , поскольку  $W_{nam}^2 \gg W_{an}^2$ , а  $\rho_{ж} \gg \rho_2$ , получим:

$$h_0 = \frac{1}{g \rho_{ж}} \left( \zeta \frac{\rho_2 W_{nam}^2}{2} - \frac{4\sigma}{D_6} \right). \quad (3.3)$$

Т.к. объем вытесненной жидкости равен объему воронки,  $V_{сл} = V_6$ , то очевидно, что  $h_0 = h_6 + h_{сл}$ . Тогда приближенное геометрическое решение дает:

$$h_6 \approx h_{сл} \cdot \delta_{сл}, \quad (3.4)$$

где  $\delta_{сл} = \left[ \frac{D_{an}^2}{D_6^2} - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{D_{an}}{D_6} \right) \right]$ .

Учитывая формулу (3.3), окончательно для динамического уровня жидкости  $h_0$  можно записать:

$$h_0 = \frac{1}{g \rho_{ж} \chi} \left( \zeta \frac{\rho_2 W_{nam}^2}{2} - \frac{4\sigma}{D_6} \right), \quad (3.5)$$

в котором  $\chi = (1 + 1/\delta_{сл})$

Аппроксимация собственных экспериментальных данных зависимости  $h_0 = f(W_{nam})$  (рисунок 3.4) позволила получить формулу для расчета коэффициента сопротивления  $\zeta$  (1.73):

$$\zeta = \frac{300}{Re_{nam}^{0,33}},$$

где  $Re_{nam} = W_{nam} \cdot D_{nam} / \nu_{\Gamma}$  - число Рейнольдса для определения режима истечения газовой струи из патрубка.

При взаимодействии струи газа с зеркалом жидкости, вследствие текучести жидкости, ее свободная поверхность будет деформироваться в соответствии с линиями равного давления, образуя эллипсоидный профиль поверхности.

Диаметр воронки, согласно [20 с.47] можно определить по формуле (1.71):

$$D_6 = 2k_b \cdot D_{nam},$$

где  $k_b$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от отношения -  $D_{an} / D_{nam}$  и определяемый по формуле (1.75):

$$k_b = \frac{0,708}{\xi_c} \cdot \ln\left(\sqrt{Re_{nam}}\right)$$

В уравнении (1.46)  $\lambda$  - опытный коэффициент, значение которого получено обработкой экспериментальных данных определяют по следующей зависимости (1.49):

$$\lambda = \frac{3,15}{Re_{нар\Box}^{0,5}},$$

Газосодержание в зоне эжекции  $\phi_3$  может быть определено по известной зависимости (1.50):

$$\phi_3 = 1 - \frac{1}{1 + \sqrt{Fr}},$$

где  $Fr$  - модифицированное число Фруда (1.51):

$$Fr = \frac{\rho_{\Gamma} \cdot W_{nam}^2}{2\rho_{ж} \cdot g \cdot h_0}$$

**Гидравлическое сопротивление насадочной зоны** определим по формуле

(1.1):

$$\Delta P_L = \xi_L \frac{H}{t_b} \cdot \frac{\rho_\Gamma \cdot W_\Gamma^2}{2\varepsilon_0^2}.$$

Коэффициент сопротивления орошаемой насадки  $\xi_L$  учитывает степень взаимодействия вихрей в вертикальном и радиальном направлениях, потери давления на трение газа о поверхность жидкости и изменение уровня жидкости. Обработкой опытных данных получено выражение для определения  $\xi_L$ :

$$\xi_L = 0,43 \cdot \theta_b \cdot \theta_p \cdot \frac{\text{Re}_{\text{ж}}^{0,25}}{\text{Re}_\Gamma^{0,1}}, \quad (3.6)$$

где  $\theta_b$  - коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в вертикальном направлении;  $\theta_p$  - коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в радиальном направлении;  $\text{Re}_{\text{ж}}$  и  $\text{Re}_\Gamma$  – критерии Рейнольдса по газу и жидкости, отнесенные к эквивалентному диаметру насадки и определяемые по уравнениям (1.3), (1.53):

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{U_{\text{ж}} \cdot d_{\text{экв}}}{\nu_{\text{ж}}}$$

$$\text{Re}_\Gamma = \frac{W_\Gamma \cdot d_{\text{экв}}}{\nu_\Gamma}$$

Эквивалентный диаметр насадки  $d_{\text{экв}}$ , входящий в выражения (1.3) и (1.53) может быть определен, исходя из [28 с.128] по следующей зависимости (1.54):

$$d_{\text{экв}} = \frac{2(t_b \cdot t_p^2 - b^2 \cdot \delta_{\text{н}})}{b^2 + 2b \cdot \delta_{\text{н}}},$$

Рассматривая силы, действующие на эжектируемую жидкость [28 с.128], получено выражение для скорости движения жидкости в следующем виде (1.55):

$$U_{\text{ж}} = 0,024 \sqrt{g \cdot \Delta h},$$

где 0,024 – опытный коэффициент, полученный сопоставлением значений гидравлического сопротивления противоточного аппарата с регулярной подвижной пластинчатой насадкой и аппарата УИД с РПН в условиях равенства расходов газового потока в насадочной зоне аппарата.

Используя известное соотношение между гидравлическим сопротивлением и величиной столба жидкости, удерживаемой газовым потоком [71]:

$$\xi_L \cdot \frac{H}{t_g} \cdot \frac{\rho_r W_r^2}{2\varepsilon_0^2} = \rho_{жс} \cdot gh_o \quad (3.7)$$

получим формулу для расчета **количества удерживаемой жидкости (КУЖ)** в аппарате с ударно-вихревым взаимодействием потоков в следующем виде (1.8):

$$h_o = 0,506 \cdot \xi_L \cdot \frac{H}{t_g} \cdot \frac{\rho_r W_r^2}{2 \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot \varepsilon_0^2} \quad (3.8)$$

Расчет **газосодержания слоя** производится по формуле (1.9):

$$\varphi = \varepsilon - \frac{h_o}{H}$$

**Коэффициенты массоотдачи в газовой фазе.** Насадочная зона представляет собой систему обтекаемых тел и поэтому при взаимодействии в нем газового потока и жидкости генерируется пульсационное движение всего слоя [36]. Кроме того происходит отрывное течение газового потока за каплей и элементами насадки с пленкой жидкости в результате чего происходит деформация свободной поверхности раздела фаз. В этом случае в пограничном слое, прилегающим к поверхности контакта фаз возникают небольшие завихренности, которые согласно [72] играют основную роль в массопереносе. От глубины проникновения завихренности, являющейся мерой толщины колеблющегося пограничного слоя, зависит интенсивность переноса массы и тепла, как в дисперсном, так и в сплошном потоках.

Согласно первому закону Фика можно записать:

$$q = -D \frac{\partial c}{\partial z} \approx -D \frac{\Delta C}{\Delta Z}, \quad (3.9)$$

где:  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $q$  – диффузионный поток кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\Delta C/\Delta Z$  – градиент концентраций.

Согласно [73] можно предположить, что  $\Delta Z \sim \delta_{n.c}$ , где  $\delta_{n.c}$  – глубина проникновения завихренности. Тогда с учетом пропорциональности коэффициента массоотдачи в газовой фазе  $\beta_2 \sim Sc_2^{1/2}$  запишем:

$$\beta_2 = \frac{q}{\Delta C} Sc_2^{1/2} = \frac{D}{\delta_{n.c}} Sc_2^{1/2}, \quad (3.10)$$

$Sc_2 = \frac{v_2}{D_2}$  - число Шмидта для сплошной фазы.

Образующиеся в аппарате с регулярной насадкой вихри, значительно различаются как по масштабам, так и по частоте. Энергия основного потока

диссипируется по механизму каскадного переноса энергии [74], от пульсаций с большими масштабами  $L$ , соизмеримыми с диаметром аппарата или высотой рабочей зоны, энергия передается во все меньшие масштабы пока не диссипируется в масштабах порядка  $l_o$ , называемых внутренним масштабом турбулентности. Согласно теории локально-изотропной турбулентности Колмогорова-Обухова [75-77]:

$$l_o = \left( \nu^3 / \varepsilon \right)^{1/4}, \quad (3.11)$$

где  $\varepsilon$  – среднее количество энергии, диссипируемое в единицу времени в единице среды, Вт/кг.

Соотношение (3.3) справедливо в инерционном интервале  $L \leq l \leq l_o$ .

В работе [78] для глубины проникновения завихренности в случае периодического изменения формы поверхности раздела относительно границы при начальном безвихревом движении получена зависимость:

$$\delta_{n.c} = \left( \frac{\nu}{\omega} \right)^{1/2}. \quad (3.12)$$

Градиенты скорости внутри вихревого слоя у границы раздела фаз по величине не больше градиентов скорости вне его [78 с.457]. Поэтому скорость диссипации энергии во всех участках потока будет одного и того порядка.

Тогда из совместного решения соотношений (3.11) и (3.12) получим частоту колебания формы свободной поверхности раздела:

$$\omega = \left( \frac{\varepsilon}{\nu} \right)^{1/2}. \quad (3.13)$$

Подставляя (3.13) в уравнение (3.12) и полученное выражение в формулу (3.10), получим:

$$\beta_c = \left( D^2 \cdot \frac{\varepsilon}{\nu} \right)^{1/4} \quad (3.14)$$

Гидродинамическую обстановку в насадочной зоне определяет в основном характер и интенсивность движения газового потока.

Жидкость находится в виде пленки на поверхности насадочных элементов, струек и капель, образуемых при срыве вихрей. Таким образом, контактная зона представляет систему, состоящую из ячеек. Образование вихрей является причиной дробления пленки жидкости на струйки, их - на капли, а также способствует пульсационной деформации их формы. Таким образом создаются идеальные условия для интенсивного проведения тепло- и массообменных процессов.

Отрывное течение потока вследствие вихреобразования способствует пульсационному движению газожидкостного слоя, которое способствует тесному перемешиванию фаз в ячейке и повышению турбулентности потоков, развитию поверхности контакта фаз, многократному дроблению жидкости и улучшению структуры газожидкостного слоя. Кроме того, появляется возможность работы при высоких скоростях газового потока без резкого увеличения брызгоуноса, что связано с сепарирующей эффективностью ячеистой структуры контактной зоны.

Поэтому при описании процесса массообмена необходимо исходить из основных закономерностей движения вихревых потоков в ячейке, образованной соседними насадочными элементами в вертикальном и радиальном направлениях [79].

Энергию диссипации вихрей, образующихся в ячейке контактной зоны, определим по уравнению:

$$\mathcal{E}_{яч} = \frac{N_e}{V_{гя} \cdot \rho_{г}} \quad (3.15)$$

Мощность вихрей в ячейке:

$$N_{яч} = C_k \cdot \frac{\pi d_k^2}{4} \cdot \frac{U_z^3}{2} \cdot \rho_z, \quad (3.16)$$

где  $c_k$  – коэффициент оценки формы капли, который можно принять как соотношение [80]:

$$c_k = KWe^{1/5}, \quad (3.17)$$

где  $We = \frac{u_z^2 \cdot d_k \cdot \rho_z}{\sigma}$  – число Вебера;  $K$ - режимный коэффициент.

Обработкой опытных данных [81] выявлено, что: при числе Рейнольдса для капель  $Re_{к.} = \frac{u_{к.} d_{к.}}{\nu_z} > 800$   $K=1,1$  и  $100 \leq Re_{к.} \leq 800$   $K = 5,5 Re_{к.}^{-0,25}$ .

Объем газа в ячейке:

$$V_{г.яч} = t_p^2 \cdot \varphi_{яч} (t_b - h_{пл}) \quad (3.18)$$

В уравнениях (3.14) – (3.16):  $h_{пл}$  – пленочная составляющая КУЖ, м;  $U_z = W_z / \varphi_{яч}$  – истинная скорость газа в ячейке, м/с;  $\varphi_{яч} = 1 - \frac{h_k}{t_b} = 1 - \frac{h_0 - h_{пл}}{t_b}$  – газосодержание слоя в ячейке;  $h_k = h_0 - h_{пл}$  – капельная составляющая КУЖ, м.

Преобразовывая уравнение (3.15) с учетом (3.16) и (3.18) имеем:

$$\Theta = \frac{3C_k \cdot U_z^3 \cdot (h_0 - h_{nl})}{4 \cdot \varphi_{яч} (t_b - h_{nl}) \cdot d_k} \quad (3.19)$$

Подставляя выражение (3.19) в (3.14), получим уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в газовой фазе:

$$\beta_{zs} = B_{\beta_{zs}} \cdot \left[ \frac{D_z^2 \cdot C_k \cdot U_z^3 \cdot (h_0 - h_{nl})}{\varphi_{яч} (t_b - h_{nl}) \cdot d_k \cdot \nu_z} \right]^{1/4}, \quad (3.20)$$

где  $B_{\beta_{zs}} = 5,53 \left( \frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/4}$  - коэффициент пропорциональности, полученный опытным путем.

Погрешность расчетных данных коэффициентов массоотдачи в газовой фазе  $\beta_{zs}$  по уравнению (3.20) с экспериментальными составила  $\pm 15\%$ .

Для расчета **эффективности пылеулавливания** в аппарате ударно-вихревого действия с двухсторонним подводом газового потока использована математическая модель инерционно-диффузионного осаждения твердых частиц. С учетом анализа механизмов осаждения исходное уравнение имеет вид (1.56) [28 с.192, 63]:

$$\eta_{общ} = 1 - (1 - \eta_{Stk}) (1 - \eta_D),$$

где  $\eta_{Stk}$ ,  $\eta_D$  - эффективность улавливания частиц за счет инерционного и диффузионного осаждения, соответственно.

Основными факторами, влияющими на процесс инерционного осаждения являются, диаметр и плотность твердых частиц, скорость их движения относительно поверхности осаждения, размер обтекаемых тел, шаги расположения насадки и расход жидкости. Эффективность осаждения в общем случае связывают с коэффициентом захвата  $K_3$ .

Тогда, эффективность пылеулавливания за счет инерционных сил можно представить в следующем виде [82]:

$$\eta_{Stk} = 1 - \exp(-K_3 Stk), \quad (3.21)$$

где  $K_3$  - коэффициент захвата;  $Stk$  - число Стокса:

$$Stk = \frac{\rho_u \cdot d_u^2 \cdot U_u}{18 \cdot \mu_r} \quad (3.22)$$

ИЛИ

$$Stk = \frac{d_u \cdot U_u}{18 \cdot \nu_r} \cdot \frac{\rho_u}{\rho_r} \quad (3.23)$$



где:  $d_c$  – диаметр частиц, м;  $U_c$  – скорость частиц, м/с;  $\rho_c$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu_r$  – коэффициент кинематической вязкости газа, м<sup>2</sup>/с;  $\mu_r$  – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с.

Известно, что коэффициент захвата  $K_3$  зависит от гидродинамической обстановки в аппарате, а именно от процесса взаимодействия твердых частиц с каплями или пленками жидкости. В зависимости от величины физико-химических сил происходит либо адгезионный захват, либо упругое отталкивание. Когда частица отталкивается, она возвращается в поток, а если произошел захват, то твердая частица внедряется в слой жидкости.

В работе [28 с.194] для оценки  $K_3$  получено уравнение (1.58) для расчета  $K_3$ :

$$K_3 = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,25)^2} \cdot \left( e^{-5,1 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{d_k}{d_c}} - e^{-4,5 \frac{l_k}{d_k}} \right)$$

где  $Stk$  - число Стокса;  $l_k = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_r - \rho_{ж})}}$  - капиллярная постоянная, м.

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

Твердые частицы пыли имеют размер значительно меньше масштаба турбулентных пульсаций и поэтому вовлекаются в пульсационное движение газового потока. Причем, степень увлечения также зависит от диаметра и плотности частиц, т.е. от ее инерционности [65 с.222]. Следовательно, при расчете эффективности осаждения в интенсивных режимах течения газа необходимо учитывать наряду с инерционным механизмом осаждения и молекулярной диффузией также турбулентную диффузию, которая вносит существенный вклад в эффективность улавливания частиц с размером 1-2 мкм и более [13].

Для определения степени пылеулавливания по диффузионной модели используем подход, описанный в работах [28 с.195, 83]. Исследуемый аппарат условно разделим на две зоны: зону эжекции и насадочную зону.

В первой зоне (зоне эжекции) высокоскоростной запыленный газовый поток ударяется о зеркало жидкости с образованием капель. Осаждение твердых частиц в этом случае происходит на поверхности капель, причем вдали от капли на частицы в зависимости от их диаметра и пульсационной скорости воздействуют турбулентные пульсации. Вблизи поверхности осаждения скорость турбулентных пульсаций резко снижается и выброс частицы происходит под действием инерционной силы с расстояния, равного длине свободного инерционного пробега частицы  $l_i$ .

Из эжекционной зоны газовый поток попадает в насадочную зону аппарата, где при обтекании насадочных элементов реализуется турбулентный режим течения. Здесь же выброс пыли из турбулентного ядра осуществляется только за счет сил инерции.

С использованием теории о локально-изотропной турбулентности Колмогорова-Обухова получены уравнения для расчета коэффициентов турбулентной диффузии:

для зоны эжекции (1.62)

$$D'_T = B_1 \cdot (\xi_{nam})^{1/3} \cdot \left( \frac{\rho_2}{\rho_{эс}} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{1}{\Delta h} \right)^{1/3} \cdot d_{k_1}^{4/3} \cdot W_{nam} \cdot Stk;$$

для насадочной зоны (1.63)

$$D''_T = B_2 \cdot (\xi_L)^{1/3} \cdot (1 - \varepsilon_0)^{1/3} \cdot \left( \frac{H}{t_g} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\rho_2}{\rho_{эс}} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{1}{h_0} \right)^{1/3} \cdot d_k^{4/3} \cdot u_2 \cdot Stk .$$

В уравнениях (1.62) и (1.63):  $B_1 = 4,5 \cdot 10^{-2}$ ;  $B_2 = 8,85 \cdot 10^{-2}$ .

Для расчета диаметра капель жидкости в насадочной зоне пластинчатой насадки и зоне эжекции в работе [28] предложены уравнения:

в насадочной зоне

$$d_k = 1,15 \cdot \xi_L^{1/3} \frac{\rho_{эс}^{1/6} \cdot d_{cmp}^{2/3} \cdot \sigma^{1/3} \cdot U_2}{U_{cmp}^{5/3} \cdot \rho_2^{1/2}}, \quad (3.24)$$

В зоне эжекции

$$d_{k_1} = 2,55 \cdot \frac{\sigma^{3/5} \cdot (1 - \varphi_3)^{2/5} \cdot h_0^{2/5}}{\rho_{эс}^{1/5} \cdot \rho_2^{2/5} \cdot W_{пат}^{6/5}}. \quad (3.25)$$

Эффективность пылеулавливания каждой из зон определим по формулам (1.60), (1.61):

$$\eta' = B'_k \cdot \left( \frac{W_{nam} \cdot d_{k_1}}{D'_m} \right)^{-1/4},$$

$$\eta'' = B''_k \cdot \left( \frac{W_2 \cdot d_k}{D''_m} \right)^{-1/4},$$

где  $B'_k, B''_k$  – опытные коэффициенты, равные соответственно  $B'_k = 5,5$ ;  $B''_k = 3,55$ .

Степень пылеулавливания по диффузионной модели рассчитываем по формуле (1.59):

$$\eta_D = 1 - (1 - \eta') \cdot (1 - \eta'').$$

Расчетные данные по уравнению (1.56) с экспериментальными, полученными с изменением режимных и конструктивных параметров расходятся не более чем  $\pm 15\%$  (см. рисунки 3.14-3.15).

## **4 ГИДРОДИНАМИКА, ТЕПЛОМАССОБМЕН И ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ АППАРАТОВ УДАРНО – ВИХРЕВОГО И ЦИКЛОННО – ВИХРЕВОГО ДЕЙСТВИЯ**

### **4.1 Конструкции аппаратов**

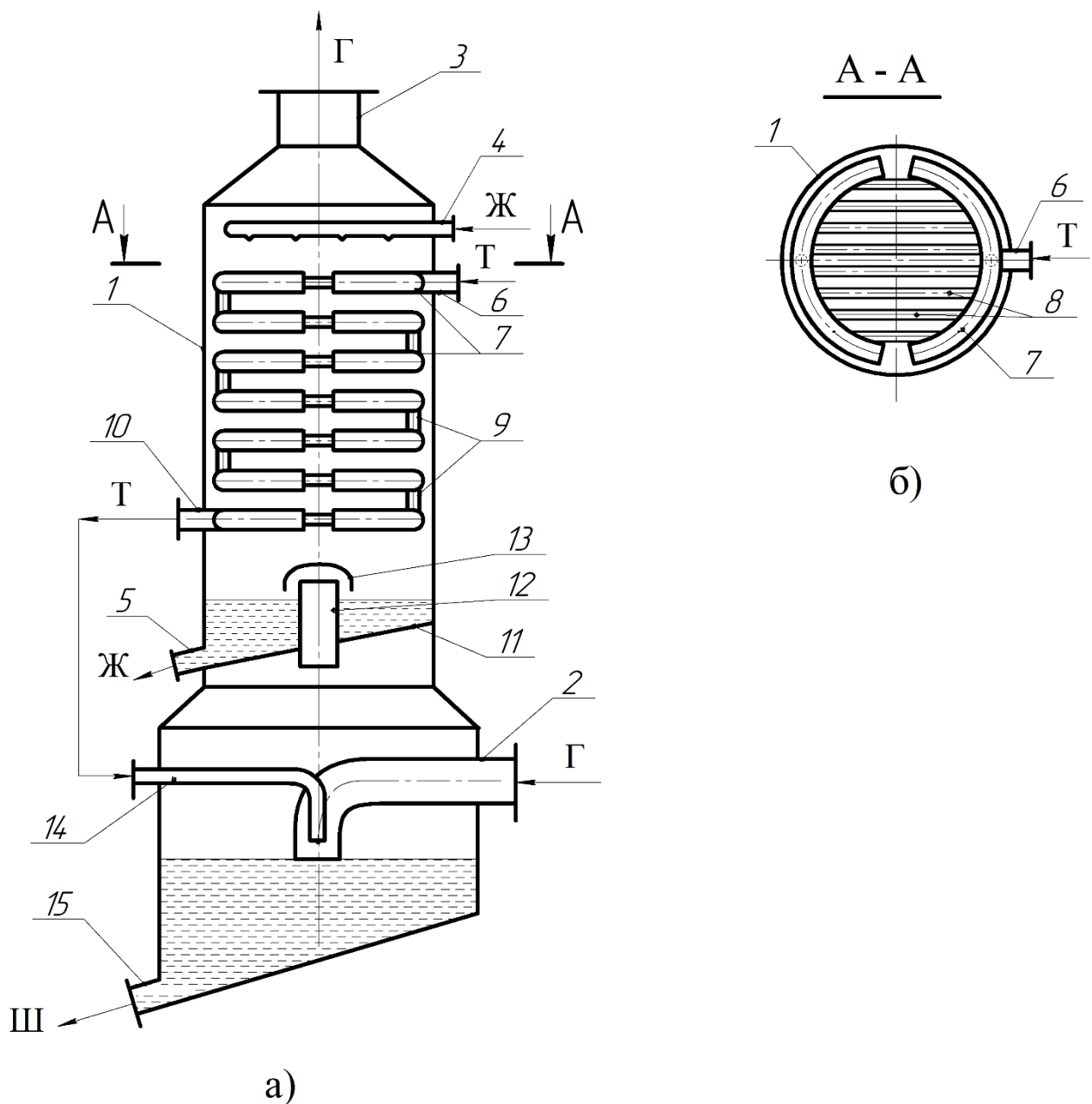
На рисунке 4.1 представлена конструкция аппарата ударно - вихревого действия с регулярной трубчатой насадкой [22].

Работа аппарата происходит следующим образом. Газовый поток, поступающий на очистку, подается через патрубок 2. Одновременно через штуцер 14, соосно расположенный с выходным концом патрубка ввода газа 2 подается теплоноситель из нижнего коллектора трубчатой насадки, расположенной в верхней ступени контакта. Объединенный поток газа и теплоносителя с высокой скоростью ударяется о поверхность жидкости, находящейся в нижней части аппарата. При ударе содержащиеся в газовом потоке твердые частицы за счет сил инерции осаждаются в жидкости. Введение теплоносителя через входной газовый патрубок 2 обеспечивает необходимую подпитку для поддержания заданного уровня жидкости относительно нижнего среза входного патрубка в нижней части аппарата. Кроме того, организация подачи теплоносителя в зону ударного взаимодействия способствует постоянному контакту запыленного газового потока со свежей жидкостью. Слив отработанной жидкости (шлама) из нижней ступени контакта осуществляется через патрубок 15.

Очищенный от пыли газовый поток через патрубок 12 расположенный в центральной части наклонной перегородки 11 и снабженный отбойным колпаком 13 поступает в верхнюю ступень контакта. Взаимодействие газа и жидкости, подаваемой через ороситель 4, происходит в противоточном режиме в объеме насадочной зоны, представляющей собой коллекторы 7 для сбора и перераспределения жидкости в виде кольца с решеткой из труб 8. Перетекание теплоносителя от одного коллектора к другому осуществляется через трубы 9. Такое исполнение трубчатой насадки обеспечивает максимальное использование закономерностей взаимодействия вихрей, заключающееся в достижении режима одновременного вихреобразования (синфазного режима). Данный режим способствует значительной интенсификации проводимых процессов за счет создания высокоразвитой поверхности контакта газовой и жидкой фаз.

Очищенный газовый поток выводится из аппарата через патрубок 3, отработанная жидкость (абсорбент) выводится через штуцер 5, а отработанный теплоноситель из штуцера 10 поступает в нижнюю ступень контакта.

Представленная конструкция аппарата ударно - вихревого действия с регулярной трубчатой насадкой была предложена при проведении промышленных испытаний в производстве окиси хрома металлургической (см. раздел 5). В лабораторных условиях исследована конструкция трубчатой насадки с выносными коллекторами, как это показано на рисунке 2.1.

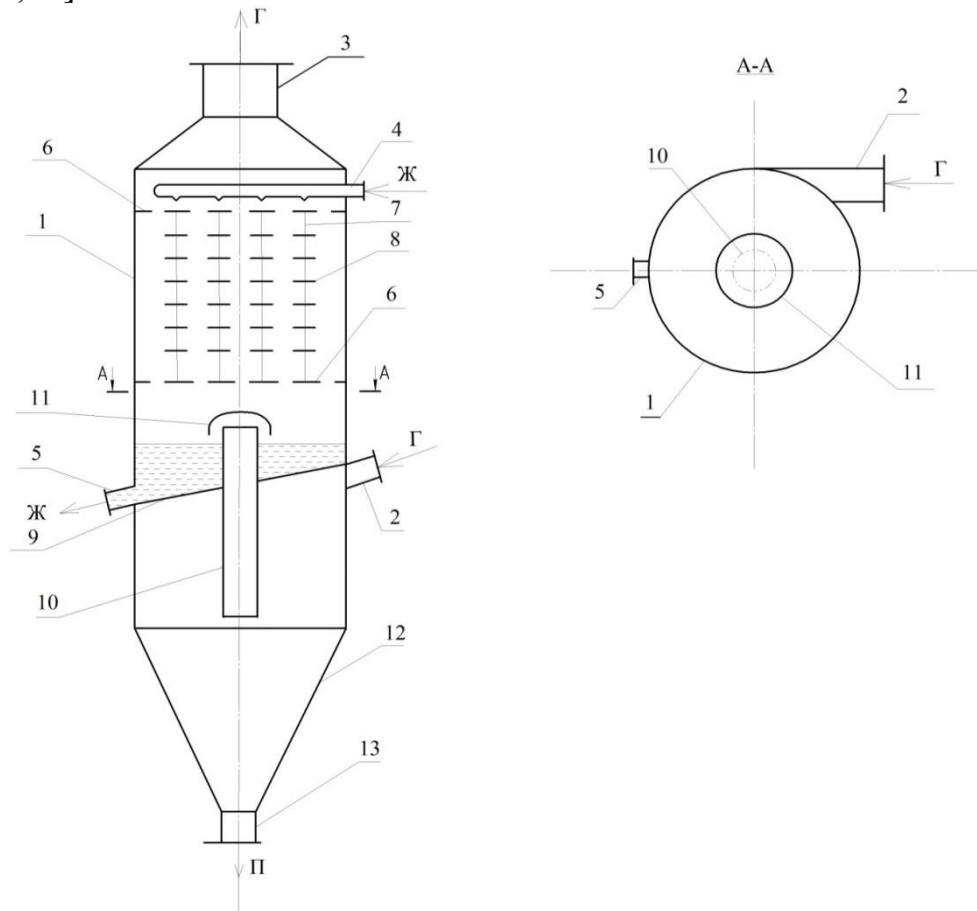


а)  
 1 – корпус; 2 - входной газовый патрубок; 3 - входной газовый патрубок;  
 4 – ороситель; 5 – штуцер слива орошающей жидкости; 6 - штуцер для подачи  
 теплоносителя; 7 – коллектор; 8 - решетка из труб; 9 – переливные трубы;  
 10 - штуцер для слива теплоносителя из коллектора; 11 – перегородка;  
 12 – центральный патрубок; 13 – отбойный колпак; 14 – штуцер ввода  
 теплоносителя во входной газовый патрубок; 15 – патрубок вывода  
 отработанного шлама

Рисунок 4.1 - Двухступенчатый аппарат ударно - вихревого действия с  
 регулярной трубчатой насадкой

В газоочистных аппаратах, использующих центробежный и вихревой механизмы, в нижней ступени контакта используется центробежный механизм улавливания пыли в отсутствии орошения жидкостью, а в верхней ступени контакта осуществляется доулавливание пыли и процесс абсорбции с

использованием закономерностей вихревого взаимодействия газа и жидкости. На рисунке 4.2 представлена конструкция аппарата циклонно-вихревого действия [23,84].



- 1 – корпус; 2 – патрубок ввода газа; 3 – патрубок вывода газа; 4 – ороситель;  
 5 – штуцер для слива отработанного поглотителя; 6 – опорно –  
 распределительная решетка; 7 – струны; 8 – насадочные тела; 9 – наклонная  
 перегородка; 10 – центральная труба; 11 – колпак; 12 – коническое днище;  
 13 - патрубок для вывода уловленной пыли

Рисунок 4.2 - Аппарат циклонно-вихревого действия

Во время работы газовый поток, поступающий на очистку, подается через штуцер 2 установленный тангенциально в нижней части аппарата. При тангенциальном подводе газового потока возникает центробежная сила, которая воздействует на твердые частицы пыли, прижимая их к внутренней стенке аппарата 1. Под действием силы тяжести твердые частицы пыли сползают в коническое днище 12 нижней ступени контакта и выводятся из аппарата через патрубок 13.

Очищенный от пыли газовый поток через верхний срез центральной трубы 10 поступает в верхнюю ступень контакта. При входе в нее центральная труба 10 снабжена колпаком 11 для исключения попадания стекающей орошающей жидкости.

Нижняя и верхняя ступени контакта разделены наклонной перегородкой 9, вследствие чего работа их происходит автономно.

Работа верхней ступени контакта происходит в противоточном режиме. В этом случае, поступающий снизу газовый поток, взаимодействует с орошающей жидкостью, подаваемой через ороситель 4 в объеме насадочной зоны. Расположение насадочных элементов 8 на струнах 7 выполнено с шагом в вертикальном направлении обеспечивающим достижение режима одновременного вихреобразования (синфазного режима).

Очищенный газовый поток выводится из аппарата через патрубок 3, а отработанная в верхней ступени жидкость удаляется через патрубок 5.

## **4.2 Вихревые ступени контакта**

### **4.2.1 Гидродинамические закономерности**

В аппаратах с регулярной подвижной насадкой наиболее важными конструктивными параметрами, наряду с геометрической формой насадочных элементов являются расстояния (или безразмерный шаг) между элементами насадки в вертикальном и радиальном направлениях. Эти характеристики во многом определяют параметры теплообмена и пылеулавливания. Основой выбора оптимальных шагов расположения явились открытия, сделанные в научной школе академика Балабекова О.С. [9,10], подтвержденные результатами многочисленных экспериментальных исследований [36, 85-90] и обобщенные в монографии [18].

Согласно открытиям и проведенным исследованиям в аппаратах с регулярным расположением элементов насадки в вертикальном направлении можно достигать режимы одновременного вихреобразования или синфазных режимы, при которых происходит суммирование мощности взаимодействующих вихрей. Это приводит к проведению большей работы по дроблению орошающей жидкости, в результате чего растет межфазная поверхность и значительно интенсифицируются проводимые процессы.

Шаги расположения зависят от формы обтекаемых тел. Для сферических насадочных элементов синфазный режим достигается при  $t_b = 4,7d$ ; призматических насадочных элементов квадратного, X-образного поперечного сечения при  $t_b = 3b$  и  $6b$ , круглого поперечного сечения и пластин при  $t_b = 2b$  и  $4b$  [18 с.169].

При изменении шагов расположения в радиальном направлении выявлено критическое расстояние между обтекаемыми насадочными элементами расположенными рядом поперек потока, соответствующее  $t_p = 2b$  [10]. При расстояниях между насадочными элементами меньше критического ( $t_p < 2b$ ) частоту образования вихрей в зазоре определяет величина зазора (размер). Когда шаг между элементами превышает критическое значение ( $t_p > 2b$ ) частоту образования вихрей определяет характерный размер элементов в миделевом сечении.

Установленные оптимальные шаги расположения насадочных тел в вертикальном и радиальном направлениях, нами были приняты при проведении

исследований гидродинамических показателей, параметров теплообмена и пылеулавливания.

В двухступенчатом аппарате ударно - вихревого действия с регулярной трубчатой насадкой вихревая ступень содержит регулярную трубчатую насадку, а в аппарате циклонно-вихревого действия вихревая ступень представлена регулярно размещенной пластинчатой насадкой. Для большинства аппаратов с регулярной структурой насадки характерны три гидродинамических режима: пленочно-капельный, капельный и брызгоуноса, существующие практически в одинаковых диапазонах скоростей [31 с.62, 91].

При скорости газа от 1 до 2,5 м/с его движение не нарушает характера течения жидкости. Поступающая через ороситель жидкость дробится на капли, которые оседают на насадочных элементах, стекают с них и по струнам в виде пленки, а в межнасадочном пространстве в виде крупных капель и струй. По характеру движения жидкости этот режим назван пленочно-капельным. Взаимодействие газа и жидкости происходит на поверхности пленок, а также на поверхности крупных капель и струй. Гидравлическое сопротивление обусловлено потерей напора газового потока на трение при прохождении через орошаемый слой пластинчатых элементов.

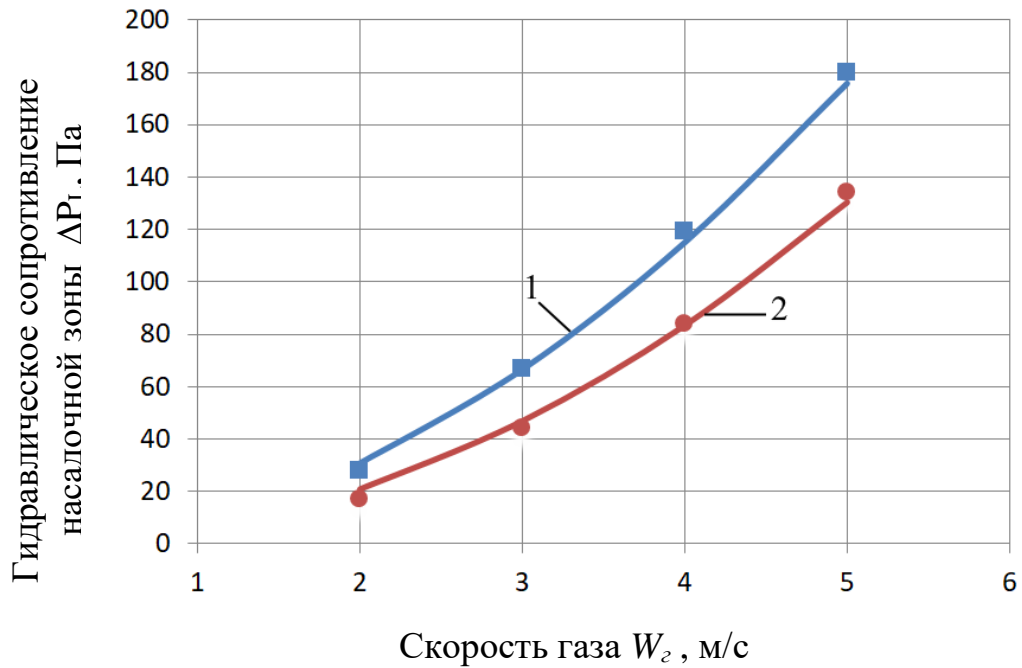
Увеличение скорости газа от 2,5 до 4 м/с приводит к наступлению капельного режима. В этом режиме кинетическая энергия газового потока достаточна для нарушения пленочного течения жидкости и образования на ее поверхности волн. Скорость течения жидкости замедляется, увеличивается толщина пленки на поверхности насадочных элементов. Волны способствуют формированию струй, которые дробятся на капли.

Наибольшей стабилизации работа аппаратов достигает при 4,0 м/с. Улучшается однородность распределения потоков по поперечному сечению аппарата, растет турбулентность газожидкостного потока за счет интенсификации процесса образования и срыва вихрей за обтекаемыми телами. Увеличение плотности орошения сдвигает конец капельного режима в сторону меньших скоростей газа.

Дальнейшее увеличение скорости газа приводит к еще большему росту его кинетической энергии. Жидкость в капельном виде увлекается газом и выносится за пределы рабочей зоны. Появление капель жидкости над рабочей зоной аппарата свидетельствует о наступлении следующего режима - режима брызгоуноса. Этот режим наступает при скорости газового потока свыше 4,0 м/с.

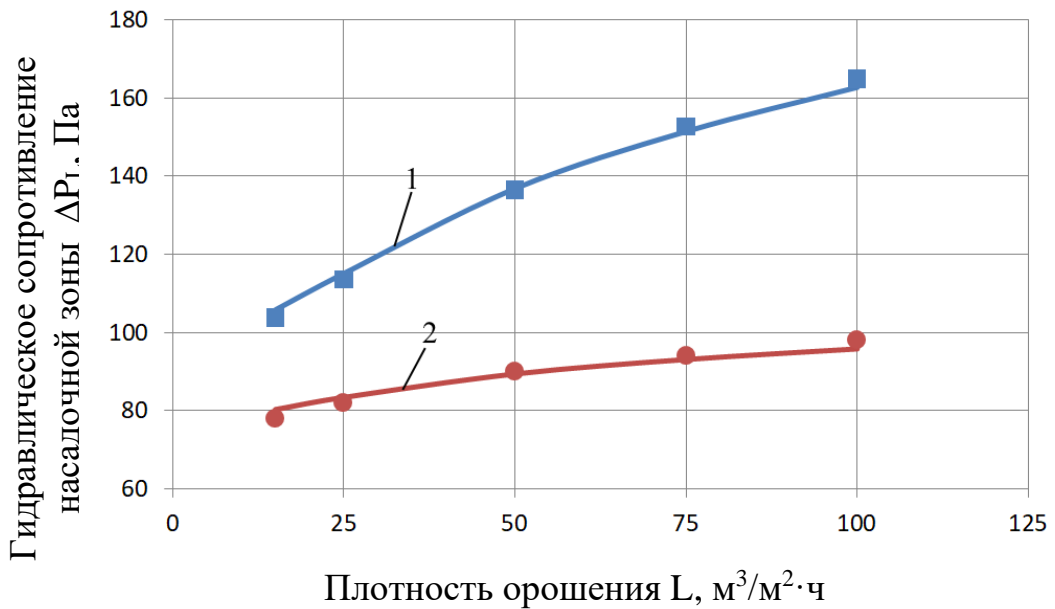
На рисунках 4.3 и 4.4 представлены результаты исследований гидравлического сопротивления, а на рисунках 4.5 и 4.6 результаты исследований количества удерживающей жидкости и газосодержания слоя аппаратов с регулярной пластинчатой и трубчатой насадкой в зависимости от скорости газа и плотности орошения.





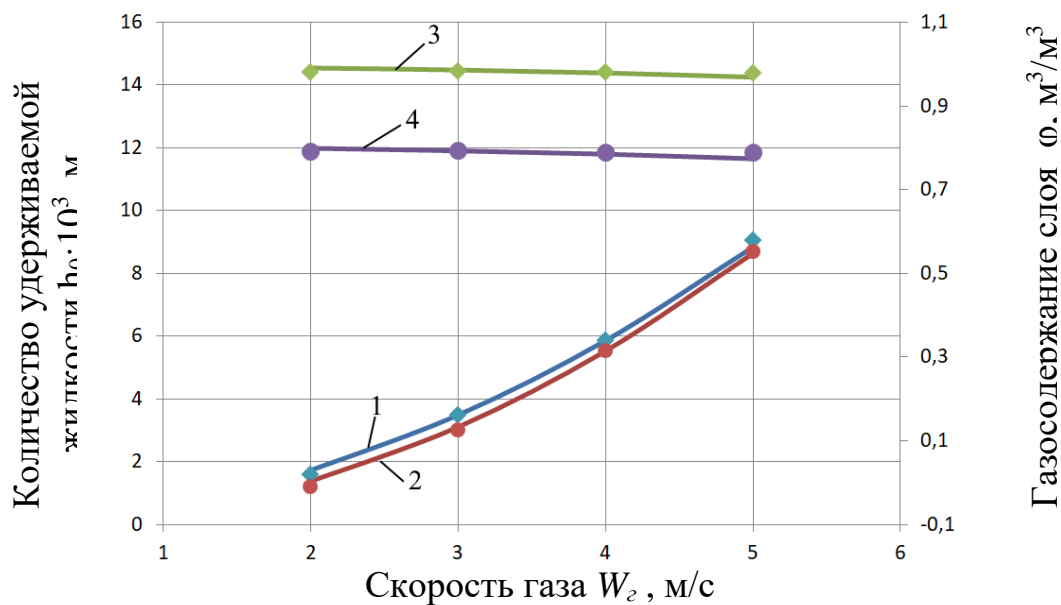
Условия опытов: пластинчатая насадка  $t_b=2b$ ;  $t_p=2b$ ;  $b \times b \times \delta=40 \times 40 \times 1$  мм;  
 трубчатая насадка  $t_b=2d$ ;  $t_p=2d$ ;  $d=25$  мм;  $L=25$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч.  
 1 и 2 -  $\Delta P_L$  - пластинчатая насадка и трубчатая насадка, соответственно.

Рисунок 4.3 - Зависимость гидравлического сопротивления насадочных зон  $\Delta P_L$  с регулярной пластинчатой и трубчатой насадкой от скорости газа  $W_{г}$



Условия опытов: см. рисунок 4.3.  $W_{г}=4$  м/с  
 1 и 2 -  $\Delta P_L$  - пластинчатая насадка и трубчатая насадка, соответственно.

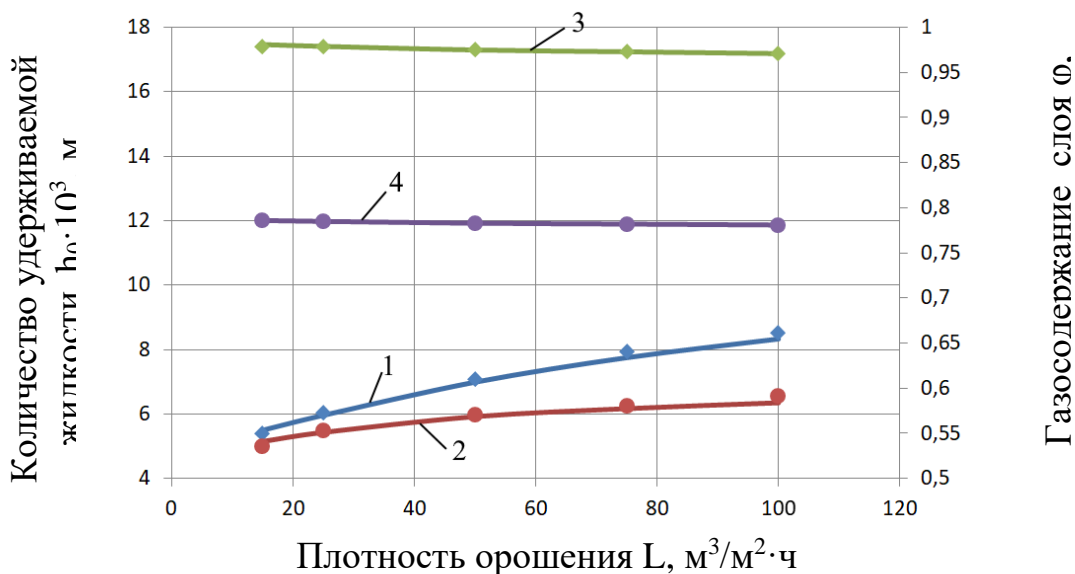
Рисунок 4.4 - Зависимость гидравлического сопротивления насадочных зон  $\Delta P_L$  с регулярной пластинчатой и трубчатой насадкой от плотности орошения  $L$



Условия опытов: см. рисунок 4.3.  $L=25 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ .

1 и 2 -  $h_0$  - пластинчатая насадка и трубчатая насадка, соответственно.  
3 и 4 -  $\phi$  - пластинчатая насадка и трубчатая насадка, соответственно.

Рисунок 4.5 - Зависимость количества удерживаемой жидкости  $h_0$  и газосодержания слоя  $\phi$  насадочных зон с регулярной пластинчатой и трубчатой насадкой от скорости газа  $W_g$



Условия опытов: см. рисунок 4.3.  $W_g=4 \text{ м/с}$

1 и 2 -  $h_0$  - пластинчатая насадка и трубчатая насадка, соответственно.  
3 и 4 -  $\phi$  - пластинчатая насадка и трубчатая насадка, соответственно.

Рисунок 4.6 - Зависимость количества удерживаемой жидкости  $h_0$  и газосодержания слоя  $\phi$  насадочных зон с регулярной пластинчатой и трубчатой насадкой от плотности орошения  $L$

Как видно из рисунков 4.3 и 4.5 увеличение скорости газового потока приводит к росту гидравлического сопротивления и количества удерживаемой жидкости, причем значения гидродинамических показателей для аппарата с регулярной пластинчатой насадкой выше, чем регулярной трубчатой насадки. Рост гидродинамических показателей в целом, 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.

Превышение гидродинамических показателей в аппарате с регулярной пластинчатой насадкой, по сравнению с трубчатой связано с показателем обтекаемости. Согласно [28 с.48] пластины относятся к плохообтекаемым телам, тогда как цилиндры к среднеобтекаемым. Коэффициент сопротивления пластин 1,1, цилиндров 0,4.

На рисунке 4.5 приведены расчетные данные по газосодержанию. Эти данные показывают, что с увеличением скорости газа значения газосодержания снижаются. Анализ причин снижения показывает, что это связано с увеличением количества задерживаемой жидкости при неизменном объеме контактной зоны.

Результаты исследований влияния плотности орошения на гидродинамические показатели (рисунки 4.4 и 4.6) 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.

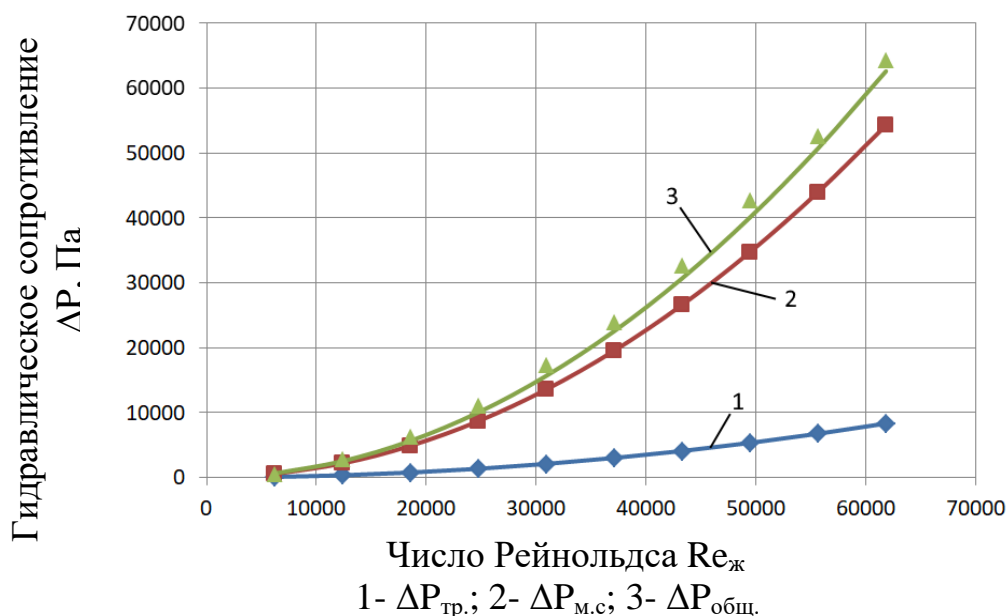


Рисунок 4.7 - Зависимость гидравлического сопротивления трубного пучка  $\Delta P$  от числа Рейнольдса  $Re_{ж}$ .

Нами проведены исследования **гидравлического сопротивления трубчатого пучка** при движении теплоносителя внутри труб (рисунок 4.7) от числа Рейнольдса  $Re_{ж}$ .

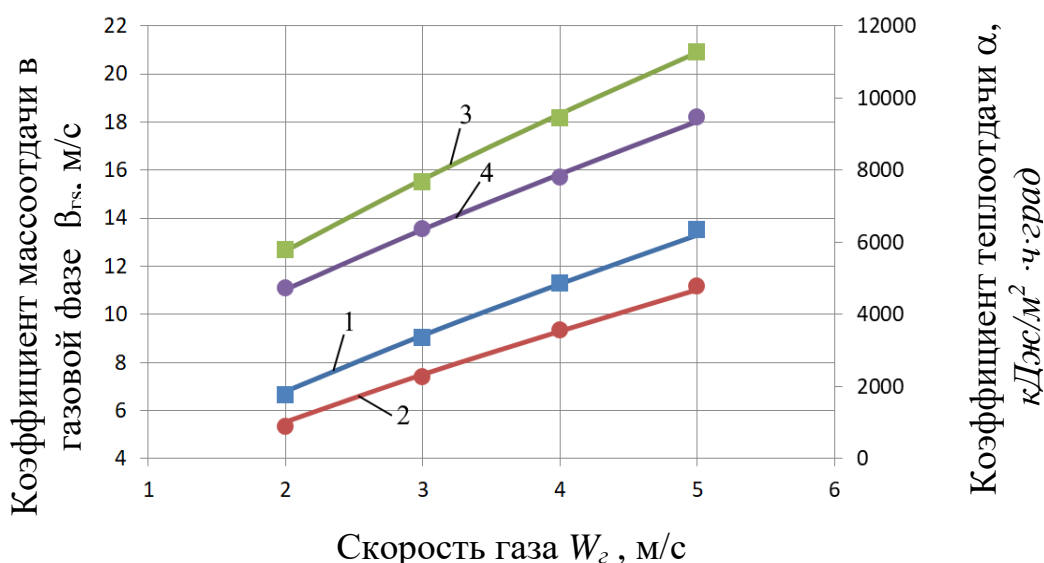
Как видно из рисунка с увеличением чисел Рейнольдса гидравлическое сопротивление трубчатого пучка возрастает, причем диапазон изменения чисел Рейнольдса охватывает переходной режим и режим развитой турбулентности. Рост гидравлического сопротивления обусловлен тем, что с увеличением скорости течения жидкости растут затраты энергии потока на преодоление местных сопротивлений и сопротивлений на трение.

#### 4.2.2 Массообменные и теплообменные характеристики

Для изучения тепломассообменных характеристик нами проведены исследования коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи [92,93].

Визуальные наблюдения за структурой потоков показывает, что в контактных зонах, независимо от типа используемой насадки, сплошным потоком является газ, а жидкость представлена пленками, струйками и каплями. При этом турбулизируемое состояние газожидкостного слоя обеспечивается вихрями, формирующимися за обтекаемыми насадочными телами.

На рисунках 4.8 и 4.9 представлены графики зависимостей коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и коэффициентов теплоотдачи от скорости газа и плотности орошения.

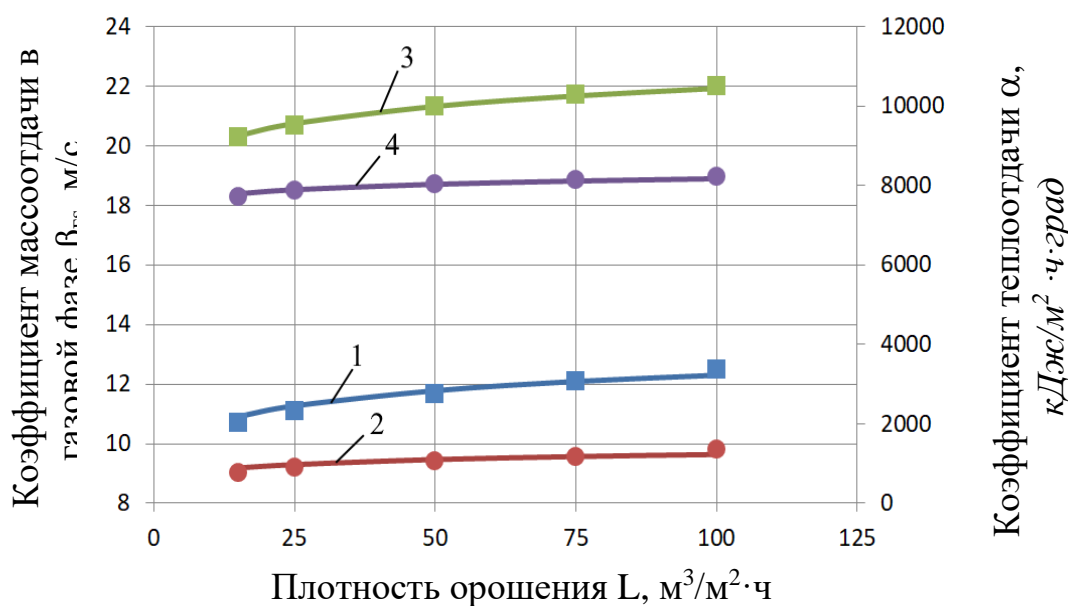


Условия опытов: см. рисунок 4.3.  $L=25 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$

1 и 2 -  $\beta_{gs}$  - пластинчатая насадка и трубчатая насадка, соответственно.

3 и 4 -  $\alpha$  - пластинчатая насадка и трубчатая насадка, соответственно.

Рисунок 4.8 - Зависимость коэффициентов массоотдачи в газовой фазе  $\beta_{gs}$  и теплоотдачи  $\alpha$  насадочных зон с регулярной пластинчатой и трубчатой насадкой от скорости газа  $W_g$



Условия опытов: см. рисунок 4.3.  $W_{\text{г}}=4 \text{ м/с}$

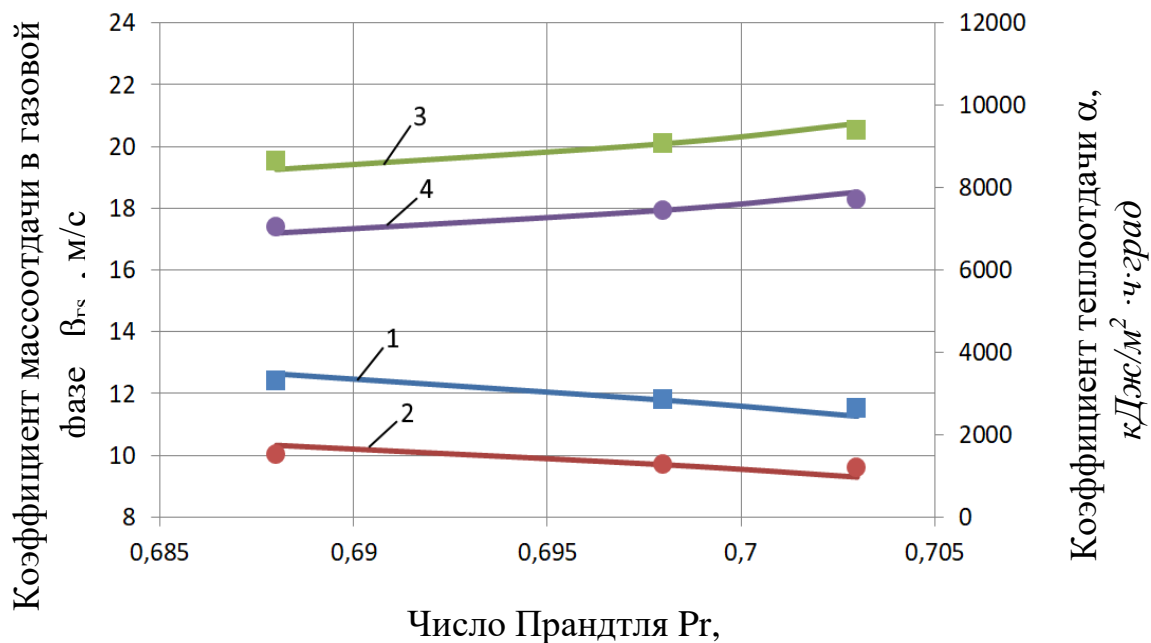
1 и 2 -  $\beta_{\text{гс}}$  - пластинчатая насадка и трубчатая насадка, соответственно.  
3 и 4 -  $\alpha$  - пластинчатая насадка и трубчатая насадка, соответственно.

Рисунок 4.9 - Зависимость коэффициентов массоотдачи в газовой фазе  $\beta_{\text{гс}}$  и теплоотдачи  $\alpha$  насадочных зон с регулярной пластинчатой и трубчатой насадкой от плотности орошения  $L$

Как видно из рисунка 4.8 с увеличением скорости газа коэффициенты массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи растут. Увеличение скорости газа способствует росту мощности образующихся вихрей, которые выполняют большую работу по дроблению жидкости и созданию высокоразвитой межфазной поверхности. Высокие значения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи наблюдаются в капельном режиме и брызгоуноса, однако режим брызгоуноса требует установки каплеуловителей, что приводит к росту энергозатрат аппарата.

С увеличением плотности орошения коэффициенты массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи незначительно растут (рисунок 4.9). Известно [47], что увеличение плотности орошения при абсорбции хорошо растворимых газов незначительно влияет на эффективность и при повышенных значениях вызывает дополнительные расходы на перекачку жидкости.

Влияние температуры газового потока на коэффициенты массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи характеризуют графические зависимости, представленные на рисунке 4.10.



Условия опытов: см. рисунок 4.3.  $W_r=4$  м/с;  $L=25$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч

1 и 2 -  $\beta_{gs}$  - пластинчатая насадка и трубчатая насадка, соответственно.

3 и 4 -  $\alpha$  - пластинчатая насадка и трубчатая насадка, соответственно.

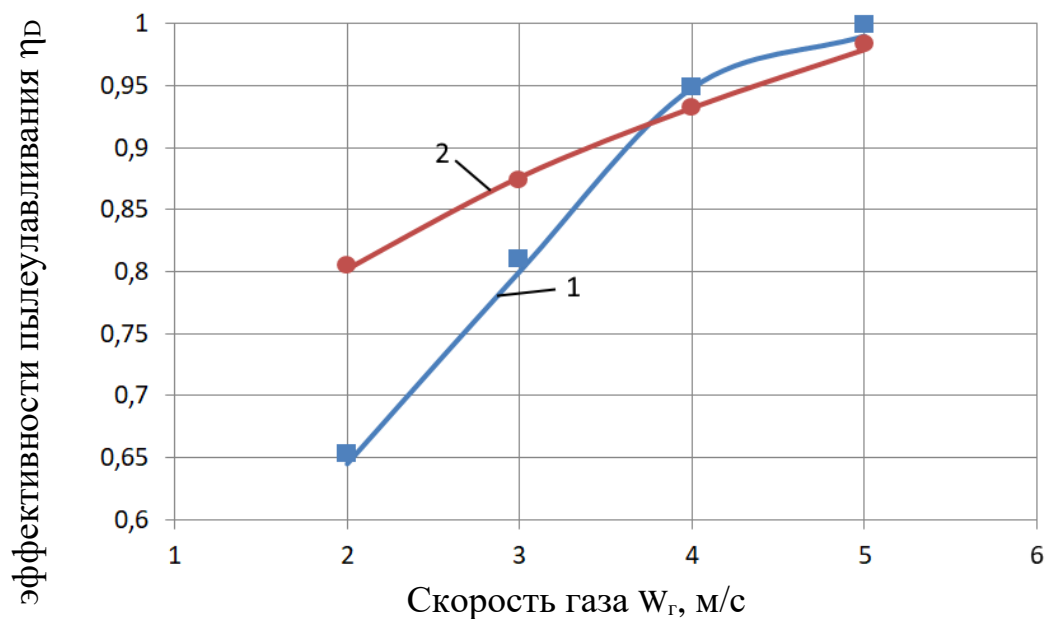
Рисунок 4.10 - Зависимость коэффициентов массоотдачи в газовой фазе  $\beta_{gs}$  и теплоотдачи  $\alpha$  насадочных зон с регулярной пластинчатой и трубчатой насадкой от чисел Прандтля  $Pr$

Как видно из графика с изменением чисел Прандтля численные значения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи меняются в небольших пределах. Это связано с тем, что и сами числа Прандтля с увеличением температуры изменяются незначительно [51] и имеют тенденцию к снижению.

### 4.2.3 Параметры пылеулавливания

Вихревые ступени двухступенчатых аппаратов ударно-вихревого и циклонно-вихревого действия в основном предназначены для проведения процессов тепломассообмена, но вместе с тем в них осуществляется доочистка пыли, выходящей из нижней ступени вместе с газовым потоком.

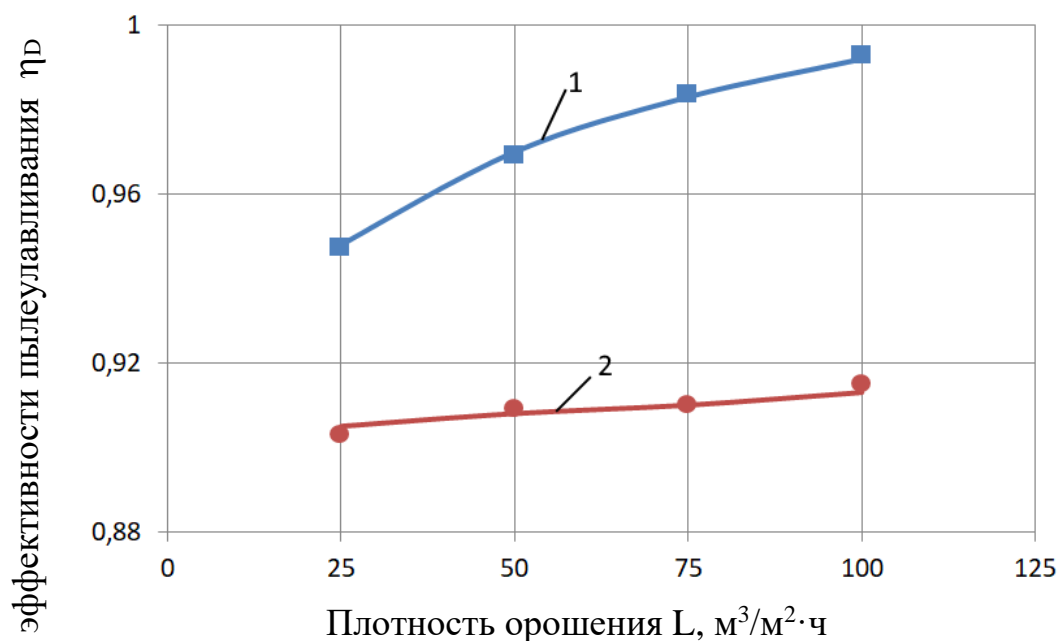
Нами проведены исследования эффективности пылеулавливания с изменением режимных параметров. На рисунках 4.11 и 4.12 приведены графики зависимостей эффективности пылеулавливания от скорости газа и плотности орошения.



Условия опытов: см. рисунок 4.3.  $d_q = 5$  мкм;  $L=25$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч.

1 и 2 -  $\eta_D$  - пластинчатая насадка и трубчатая насадка, соответственно.

Рисунок 4.11 - Зависимость эффективности пылеулавливания  $\eta_D$  насадочных зон с регулярной пластинчатой и трубчатой насадкой от скорости газа  $W_g$



Условия опытов: см. рисунок 4.3.  $d_q = 5$  мкм;  $W_g=4$  м/с.

1 и 2 -  $\eta_D$  - пластинчатая насадка и трубчатая насадка, соответственно.

Рисунок 4.12 - Зависимость эффективности пылеулавливания  $\eta_D$  насадочных зон с регулярной пластинчатой и трубчатой насадкой от плотности орошения  $L$

Как видно из рисунка 4.11 увеличение скорости газового потока приводит к росту эффективности пылеулавливания, которая достигает максимальных значений в капельном режиме. Происходит выравнивание и снижение средних значений диаметров капель, что достигается за счет достижения синфазного режима. Растет поверхность контакта фаз, а, в конечном счете, и эффективность пылеулавливания. В процессе доочистки газового потока от пыли размер улавливаемых частиц составляет от 5 мкм до 1-2 мкм, в этой связи значительную роль играет молекулярная и турбулентная диффузия [13]. Более высокие значения эффективности пылеулавливания  $\eta_D$  в насадочной зоне с трубчатой насадкой в сравнении с пластинчатой обусловлены тем, что турбулентная диффузия присутствует в двух ступенях – ударного и вихревого взаимодействия потоков.

Дальнейшее увеличение скорости приводит к наступлению режима брызгоуноса, в котором происходит некоторое снижение эффективности.

Рост плотности орошения приводит к незначительному увеличению эффективности пылеулавливания (рисунок 4.12). Это происходит за счет увеличения общего количества дробимых капель вследствие притока свежей жидкости.

### **4.3 Ступени ударного взаимодействия газа и жидкости и центробежного осаждения твердых частиц**

#### **4.3.1 Гидродинамические закономерности**

Результаты проведенных исследований гидравлического сопротивления зоны ударного взаимодействия газового потока с жидкостью в двухступенчатом аппарате ударно - вихревого действия с регулярной трубчатой насадкой, наклонной перегородки и общего гидравлического сопротивления в зависимости от скорости газа во входном патрубке и исходного уровня жидкости приведены на рисунках 4.13 и 4.14 [94].

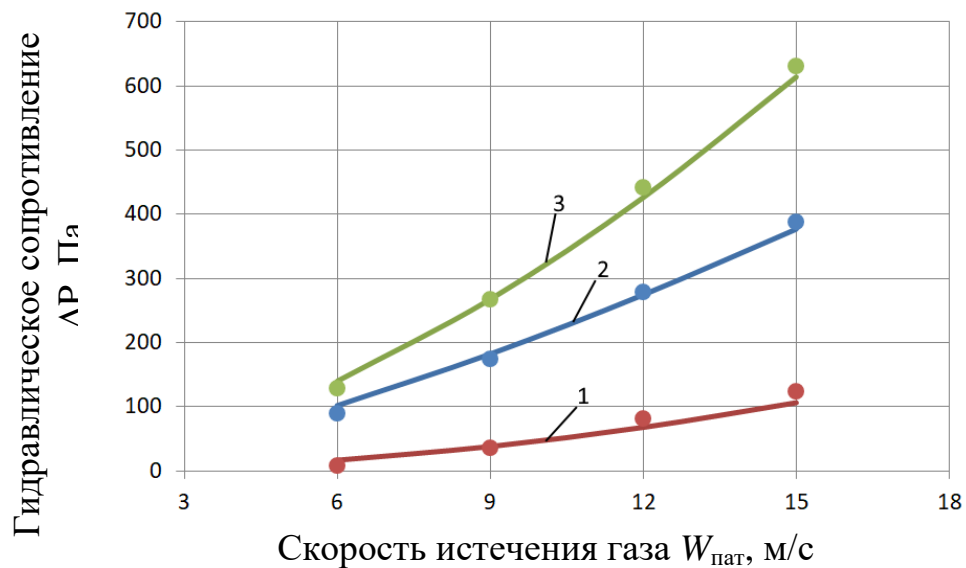
Как видно из рисунка 4.13 с увеличением скорости газа во входном патрубке гидравлическое сопротивление исследуемых зон, а также общее гидравлическое сопротивление растут.

Рост гидравлического сопротивления зоны ударного взаимодействия газового потока с жидкостью обусловлен затратами энергии потока на создание жидкостной воронки, трение газа о поверхность жидкости и дробление жидкости в зоне удара, а также на осуществление поворота газового потока на  $180^0$ .

Увеличение гидравлического сопротивления зоны преодоления наклонной перегородки связано с местными сопротивлениями при выходе газового потока из под колпака и изменения направления движения газового потока.

Рост общего гидравлического сопротивления аппарата с увеличением скорости газового потока обусловлен ростом сопротивлений зоны ударного взаимодействия газового потока с жидкостью, зоны преодоления наклонной перегородки и насадочной зоны.

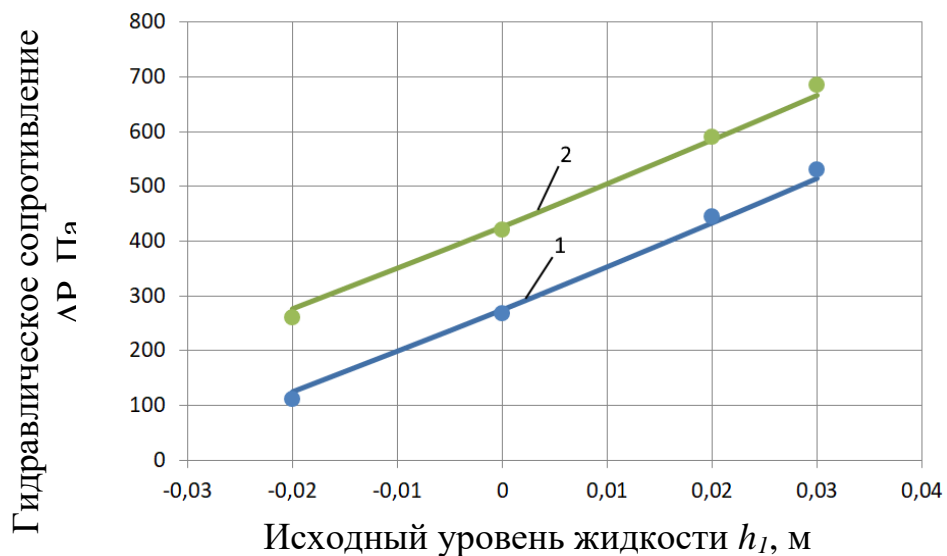




Условия опытов:  $d_{пат}=0,2\text{м}$ ;  $h_1=0\text{ м}$ .

1 -  $\Delta P_{н.п.}$  – наклонной перегородки; 2 -  $\Delta P_{э}$  - зоны эжекции; 3 –  $\Delta P_{общ}$  – общего сопротивления

Рисунок 4.13- Зависимость гидравлического сопротивления зоны эжекции  $\Delta P_{э}$ , и общего сопротивления  $\Delta P_{общ}$  от скорости истечения газа  $W_{пат}$



Условия опытов: см. рисунок 4.13.  $W_{пат}=12\text{ м/с}$ .

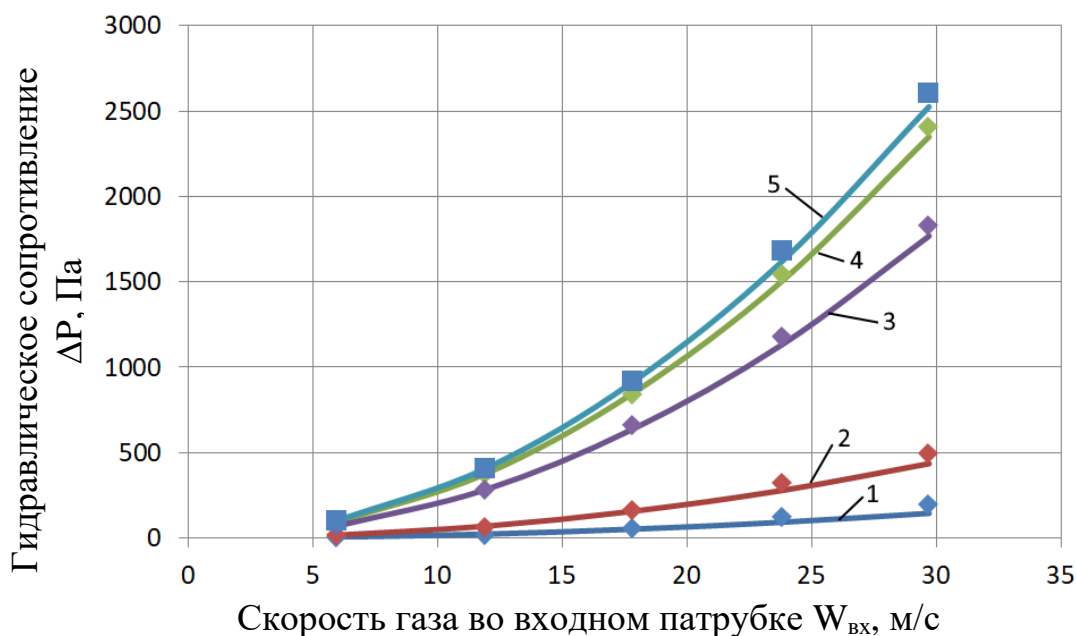
1 -  $\Delta P_{э}$  - зоны эжекции; 2 –  $\Delta P_{общ}$  – общего сопротивления

Рисунок 4.14- Зависимость гидравлического сопротивления зоны эжекции  $\Delta P_{э}$ , и общего сопротивления  $\Delta P_{общ}$  от исходного уровня жидкости  $h_1$

Рост общего гидравлического сопротивления при изменении исходного уровня жидкости (рисунок 4.14) в основном зависит от сопротивления зоны

ударного взаимодействия газового потока с жидкостью, тогда как гидравлическое сопротивление зоны преодоления наклонной перегородки и насадочной зоны остаются неизменными. В этом заключается одно из преимуществ двухступенчатых аппаратов, имеющих автономные контуры орошения.

Результаты исследования гидравлического сопротивления составляющих ступени центробежного осаждения твердых частиц и аппарата циклонно-вихревого действия представлены на рисунке 4.15. Нами исследовалось гидравлическое сопротивление входного участка  $\Delta P_{вх}$ , гидравлическое сопротивление кольцевой зоны  $\Delta P_{кольц}$ , гидравлическое сопротивление выходного участка  $\Delta P_{вых}$  и гидравлическое сопротивление циклонной ступени  $\Delta P_{ц}$  [91]. На этом же рисунке приведена кривая характеризующая общее сопротивление аппарата  $\Delta P_{общ}$ .



Условия опытов:  $a \times b_1 = 0,264 \times 0,104$  м (размер входного патрубка: а – высота,  $b_1$  – ширина)

1 –  $\Delta P_{кольц}$ ; 2 –  $\Delta P_{вых}$ ; 3 –  $\Delta P_{вх}$ ; 4 –  $\Delta P_{ц}$ ; 5 –  $\Delta P_{общ}$ .

Рисунок 4.15 - Зависимость гидравлического сопротивления составляющих циклонной ступени  $\Delta P_{кольц}$ ,  $\Delta P_{вых}$ ,  $\Delta P_{ц}$  от скорости газа во входном патрубке  $W_{вх}$

Как видно из графика гидравлическое сопротивление циклонной ступени и всех ее составляющих растет. Это очевидно, так как рост гидравлического сопротивления при увеличении скорости газа обусловлен ростом динамического напора и потерями, связанными с изменением направления движения газа и потерями на трение. Кривая характеризующая общее сопротивление аппарата в основном определяется значениями гидравлического сопротивления циклонной ступени.

На рисунке 4.16 приведен сопоставительный график общего гидравлического сопротивления аппаратов, имеющих две ступени контакта: двухступенчатого аппарата ударно - вихревого действия с регулярной трубчатой насадкой (АУВД с ТН), аппарата циклонно-вихревого действия (АЦВД) и комбинированного аппарата инерционно-турбулентного действия (КАИТ) с автономными контурами орошения [20 с.98]. Для аппарата КАИТ для сопоставительного анализа взяты результаты гидравлического сопротивления, полученные при рекомендованных значениях режимных и конструктивных параметрах [95]:

насадочная зона

- скорость газа в зоне абсорбции  $W_{з.а} = 1-2$  м/с;

- плотность орошения  $L = 20 \div 50$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч;

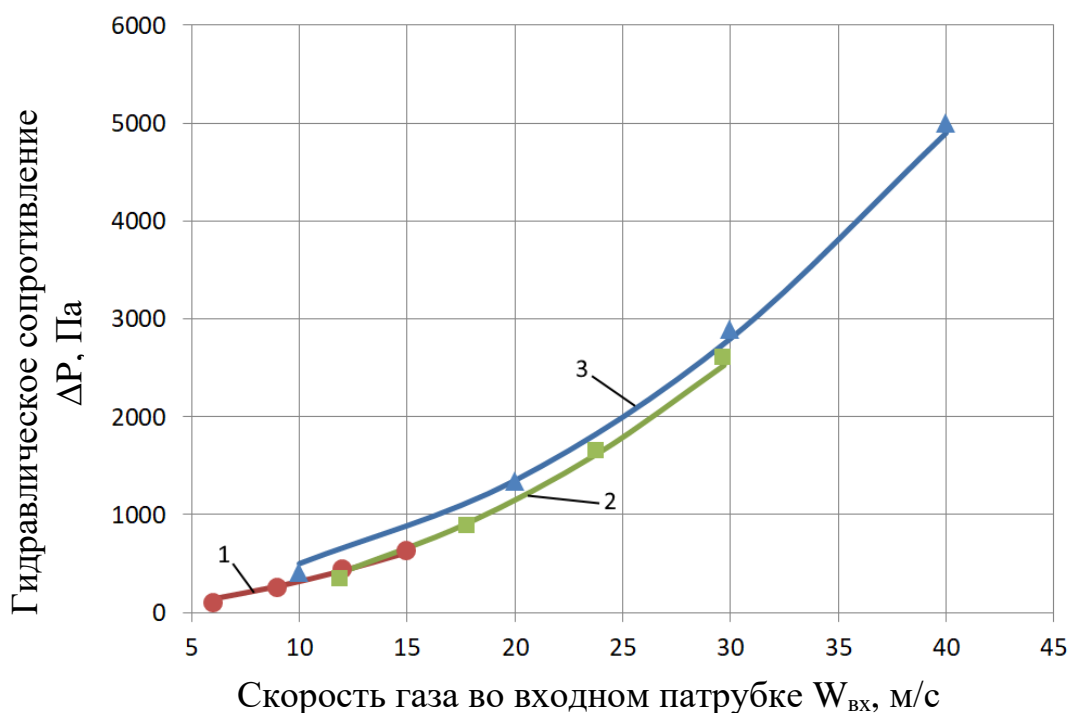
- конструктивные параметры насадки: высота контактной зоны  $H_n = 1-2$  м;

расположение пластин – шахматное; шаг по вертикали  $t_v/b = 2$ ; шаг по горизонтали  $t_p/b = 2$ ;  $b = 0,05$  м.

зона ударно-инерционного взаимодействия потоков

- скорость газа в патрубке  $W_{пат} = 30-35$  м/с;

- диаметр патрубка  $D_{пат} = 0,2$  м.



1 -  $\Delta P_{обц}^{АУВД}$ ; 2 -  $\Delta P_{обц}^{АЦВД}$ ; 3 -  $\Delta P_{обц}^{КАИТ}$ .

Рисунок 4.16 - Зависимость гидравлического сопротивления аппаратов с двумя ступенями контакта от скорости газа во входном патрубке

Как видно из рисунка общее гидравлическое сопротивление всех исследуемых аппаратов с увеличением скорости газа во входном патрубке растет. Этот рост обусловлен многократным изменением направления газового

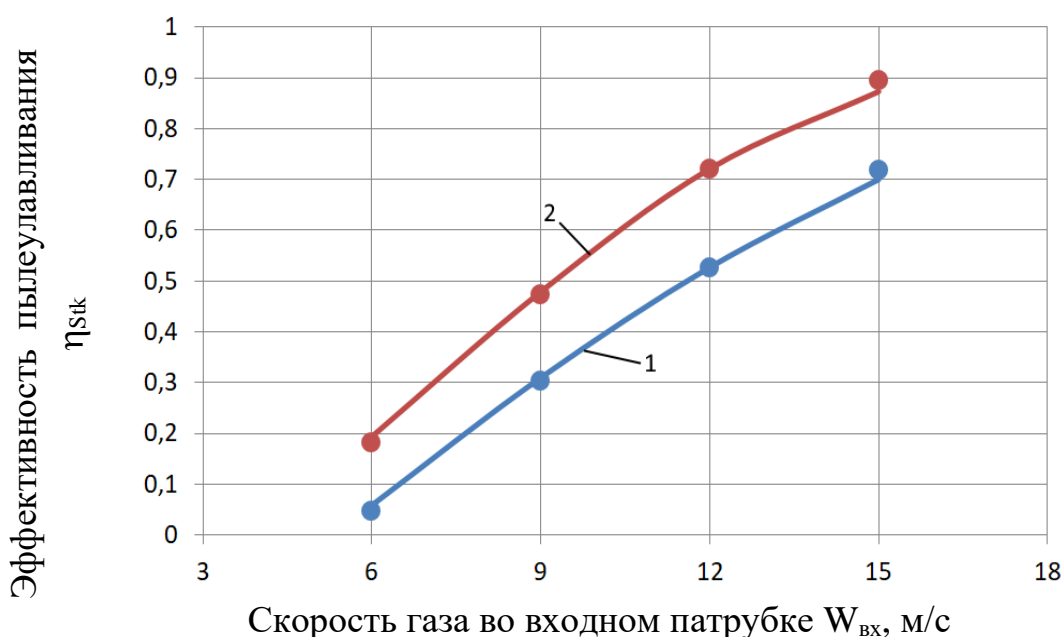
потока, потерями на трение, формированием вихревой структуры взаимодействия потоков, внезапным расширением и сужением потока и рядом других факторов.

Из рисунка 4.16 видно, что диапазон изменения скорости газа на входе в аппарате КАИТ составляет от 10 до 40 м/с. Это приводит к значительному росту гидравлического сопротивления. Нами проведены исследования гидравлического сопротивления аппарата АУВД с диапазоном скоростей во входном патрубке от 6 до 15 м/с, что привело к снижению гидравлического сопротивления более чем в 2,5 раза, и, как будет показано ниже без снижения эффективности пылеулавливания.

### 4.3.2 Параметры пылеулавливания

Нами проведены исследования эффективности пылеулавливания зоны ударного взаимодействия аппарата АУВД, зоны действия центробежной силы в аппарате АЦВД и их общей эффективности, учитывающей насадочную зону.

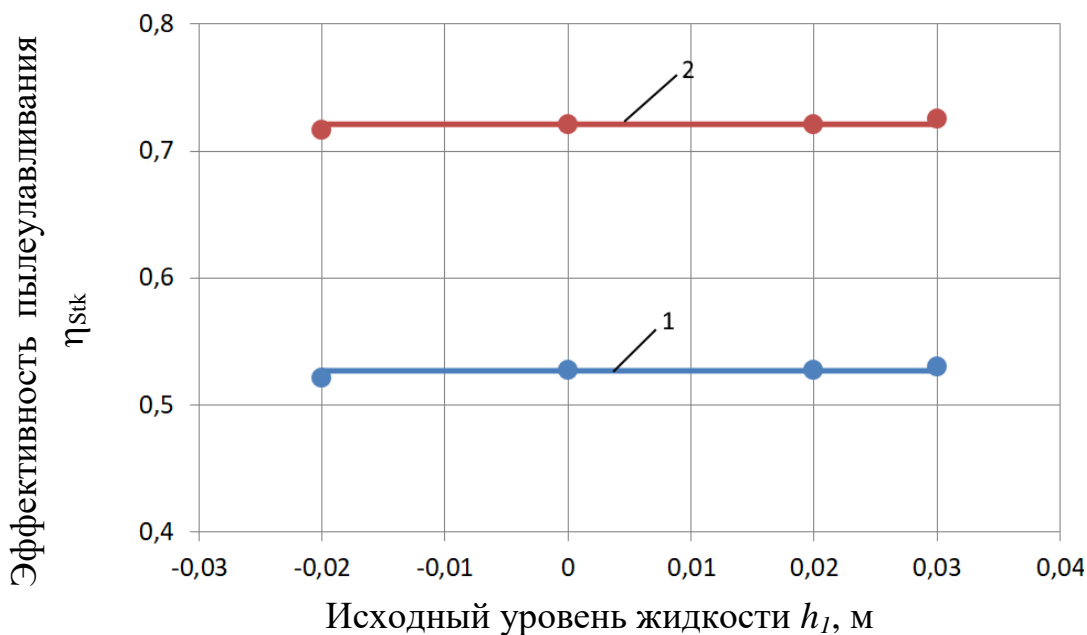
На рисунках 4.17 и 4.18 представлены графики зависимости эффективности пылеулавливания **зоны ударного взаимодействия газового потока с жидкостью** при изменении скорости газа во входном патрубке и исходного уровня жидкости.



Условия опытов: см. рисунок 4.13

1 и 2 -  $\eta_{stk}$  при  $d_{ч} = 5$  и  $10$  мкм, соответственно.

Рисунок 4.17 - Зависимость эффективности пылеулавливания зоны ударного взаимодействия газового потока с жидкостью  $\eta_{stk}$  от скорости газа на входе  $W_{вх}$



Условия опытов: см. рисунок 4.13

1 и 2 -  $\eta_{stk}$  при  $d_{ch} = 5$  и  $10$  мкм, соответственно.

Рисунок 4.18 - Зависимость эффективности пылеулавливания зоны ударного взаимодействия газового потока с жидкостью  $\eta_{stk}$  от исходного уровня жидкости  $h_l$

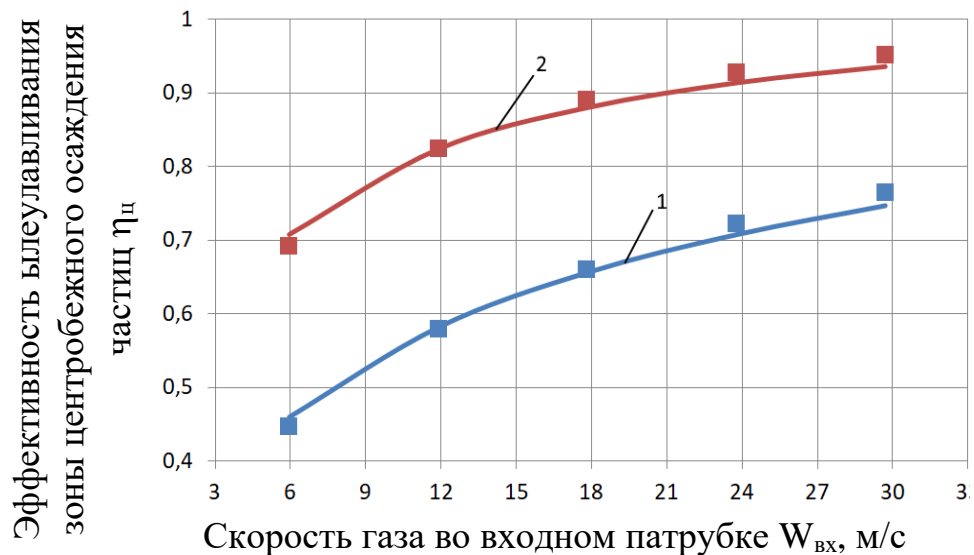
Как видно из рисунка 4.17 с увеличением скорости во входном патрубке эффективность пылеулавливания растет. При организации ударного взаимодействия газа с жидкостью реализуется инерционный механизм осаждения. И чем выше скорость газа, тем большее количество частиц осаждается в жидкости.

Известно, что основными факторами, влияющими на процесс инерционного осаждения, помимо скорости газа являются диаметр, плотность частиц и скорость их движения относительно поверхности осаждения. Из рисунка 4.17 видно, что увеличение размеров частиц, а, следовательно, их веса способствует росту эффективности улавливания твердых частиц.

Увеличение исходного уровня жидкости незначительно влияет на эффективность улавливания твердых частиц (рисунок 4.18).

На рисунке 4.19 представлен график зависимости эффективности пылеулавливания **ступени центробежного осаждения твердых частиц** от скорости газа на входе.

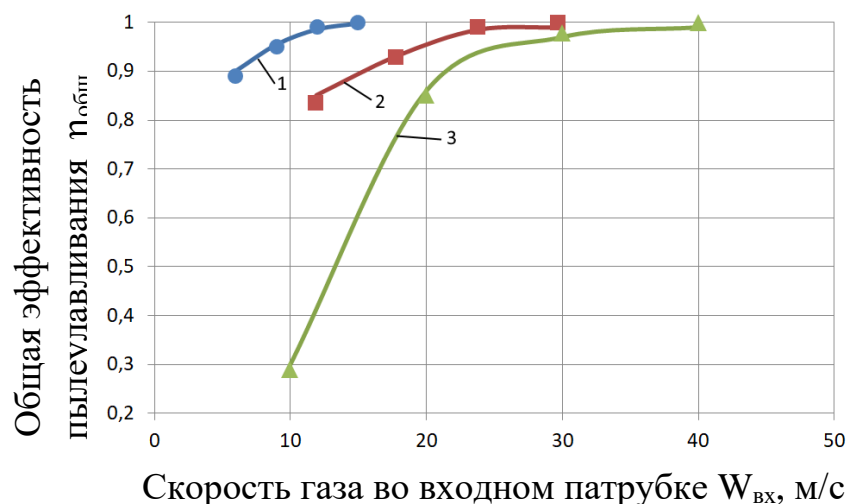
На рисунке 4.20 приведен сопоставительный график общей эффективности пылеулавливания в аппаратах АУВД, АЦВД и КАИТ [77] от скорости газа во входном патрубке.



Условия опытов: см. рисунок 4.15  
 1 и 2 -  $\eta_c$  при  $d_{ч} = 5$  и  $10$  мкм, соответственно.

Рисунок 4.19 - Зависимость эффективности пылеулавливания зоны центробежного осаждения твердых частиц  $\eta_c$  от скорости газа на входе  $W_{вх}$

Как видно из рисунка 4.19 увеличение расхода газового потока приводит к росту эффективности пылеулавливания. Это связано с тем, что с увеличением скорости газа растет центробежная сила, воздействующая на твердые частицы. В результате эффективность пылеулавливания увеличивается. Увеличение размеров движущихся твердых частиц (их веса) приводит к росту силы инерции, благодаря чему осаждение происходит более эффективно.



1 -  $\eta_{общ}^{АУВД}$  ; 2 -  $\eta_{общ}^{АПВД}$  ; 3 -  $\eta_{общ}^{КАИТ}$  .

Рисунок 4.20 - Зависимость общей эффективности пылеулавливания аппаратов с двумя ступенями контакта от скорости газа во входном патрубке

Как видно из рисунка 4.20 с увеличением скорости газа во входном патрубке общая эффективность пылеулавливания сравниваемых аппаратов растет. Это связано с повышением эффективности пылеулавливания в ступенях аппаратов, где используются наиболее эффективные механизмы пылеулавливания. Высокие значения эффективности пылеулавливания в аппаратах АУВД и АЦВД достигаются при более низких скоростях газового потока на входе, тогда как для аппарата КАИТ требуются более высокие скорости газового потока на входе, а это сопряжено с повышенными энергозатратами.

#### 4.4 Методики расчета аппаратов

##### 4.4.1 Расчет вихревой ступени [94,96]

Гидравлическое сопротивление определяется по формуле (1.1):

$$\Delta P_L = \xi_L \frac{H}{t_B} \cdot \frac{\rho_r \cdot W_r^2}{2\varepsilon_0^2}.$$

Коэффициент сопротивления орошаемой насадки  $\xi_L$ :  
пластинчатой (3.6)

$$\xi_L = 0,43 \cdot \theta_B \cdot \theta_P \cdot \frac{\text{Re}_{\text{жс}}^{0,25}}{\text{Re}_2^{0,1}}$$

трубчатой

$$\xi_L = 0,195 \cdot \theta_B \cdot \theta_P \cdot \text{Re}_{\text{жс}}^{0,1} \quad (4.1)$$

Порозность ряда насадки  $\varepsilon_0$ :  
пластинчатой

$$\varepsilon_0 = 1 - \left( \frac{b}{t_p} \right)^2 \quad (4.2)$$

трубчатой (1.25)

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{d}{t_p}$$

Критерии Рейнольдса по газу и жидкости, отнесенные к эквивалентному диаметру насадки и рассчитываются по уравнениям (1.3), (1.53):

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{U_{\text{ж}} \cdot d_{\text{экв}}}{\nu_{\text{ж}}}$$

$$\text{Re}_{\text{г}} = \frac{W_{\text{г}} \cdot d_{\text{экв}}}{\nu_{\text{г}}}$$

Эквивалентный диаметр насадки  $d_{\text{ЭКВ}}$ :  
пластинчатой (1.54)

$$d_{\text{ЭКВ}} = \frac{2(t_b \cdot t_p^2 - b^2 \cdot \delta_n)}{b^2 + 2b \cdot \delta_n}$$

$\delta_n$  – толщина пластин, м.  
трубчатой (1.19)

$$d_{\text{ЭКВ}} = \frac{4 \cdot t_b \cdot t_p - \pi d^2}{\pi d}$$

### Количество удерживаемой жидкости (КУЖ).

Для вихревой ступени аппарата циклонно-вихревого действия использован подход, описанный в работах [85 с.99, 88,97]. Уравнение для расчета КУЖ имеет вид (1.22):

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

Пленочная составляющая этого уравнения  $h_{\text{пл}}$  определяется по зависимости (1.23):

$$h_{\text{пл}} = \delta_{\text{пл}} (1 - \varepsilon_0)$$

Капельная составляющая  $h_k$  определяется на основе балансового уравнения сохранения энергии [98] газового потока при одномерном и установившемся движении его в элементарном объеме одной ячейки и диссипативного подхода. После соответствующих преобразований уравнение для расчета имеет вид:

$$h_k = 0,88 \cdot \xi_L \cdot \frac{\rho_r W_r^2}{2g\rho_{\text{ж}}} \cdot \frac{(2 - \varepsilon_0)(1 - \varepsilon_0^2)}{\varepsilon_0^2} \quad (4.3)$$

Для двухступенчатого аппарата ударно - вихревого действия с регулярной трубчатой насадкой уравнение для расчета количества удерживаемой жидкости получено из соотношения между гидравлическим сопротивлением и величиной столба жидкости, удерживаемой газовым потоком [30 с.46, 99]:

$$h_0 = 0,65 \cdot \xi_L \cdot \frac{H}{t_b} \cdot \frac{\rho_r W_r^2}{2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot \varepsilon_0^2}, \quad (4.4)$$

Газосодержание слоя определим расчетным путем по формуле (1.9):



$$\varphi = \varepsilon - \frac{h_0}{H},$$

Объемная порозность  $\varepsilon$ , входящая в эту формулу (1.9) - для труб с круглым поперечным сечением  $\varepsilon = 1 - \frac{\pi d_u^2}{4t_s \cdot t_p}$ ; для пластинчатой насадки  $\varepsilon = 1 - \frac{b^2 \cdot \delta_n}{t_b \cdot t_p^2}$

Для получения расчетных зависимостей **коэффициентов массоотдачи в газовой фазе** вихревых ступеней с пластинчатой и трубчатой насадкой использован единый подход [93,100], базирующийся на использовании первого закона Фика. После подстановки в уравнение всех входящих в него величин получим уравнение (3.14):

$$\beta_2 = \left( D^2 \cdot \frac{\mathcal{E}}{\nu} \right)^{1/4}$$

При описании процесса массообмена в аппарате с регулярной подвижной насадкой необходимо исходить из основных закономерностей движения вихревых потоков в ячейке, образованной соседними насадочными элементами в вертикальном и радиальном направлениях [79].

Энергию диссипации вихрей, образующихся в ячейке контактной зоны, определим по уравнению (3.15):

$$\mathcal{E}_{яч} = \frac{N_b}{V_{г.яч} \cdot \rho_{г}}$$

Для вихревой зоны с пластинчатой насадкой  
Мощность вихрей в ячейке:

$$N_b = \xi_L \cdot b^2 \rho_{г} \cdot \frac{U_{г}^3}{2}. \quad (4.5)$$

Объем газа в ячейке (3.18):

$$V_{г.яч.} = t_p^2 \cdot (t_s - h_{нл}) \cdot \Phi_{яч.}$$

В уравнениях (3.14 – 3.15), (4.5):  $h_{нл} = \delta_{нл} \cdot (1 - \varepsilon_0)$  – пленочная составляющая КУЖ, м;  $U_{г} = W_{г} / \varphi_{яч}$  – истинная скорость газа в ячейке, м/с;

$\varphi_{яч} = 1 - \frac{h_k}{t_b} = 1 - \frac{h_0 - h_{нл}}{t_b}$  – газосодержание слоя в ячейке;

$h_k = h_0 - h_{нл}$  – капельная составляющая КУЖ, м.

В исследуемом диапазоне шагов между пластинами по вертикали отношение  $t_B/h_{пл} > 10^3$ , поэтому пленочной составляющей в уравнении (3.18) пренебрегаем. Тогда это уравнение примет вид:

$$V_{г.яч.} = t_p^2 \cdot t_B \cdot \varphi_{яч.} \quad (4.6)$$

Преобразовывая уравнение (3.15) с учетом (4.5) и (4.6) имеем:

$$\Xi_{яч.} = \xi_L \frac{b^2 \cdot U_\Gamma^3}{2t_p^2 \cdot t_B \cdot \varphi_{яч.}} \quad (4.7)$$

В полученном выражении  $\frac{b^2}{t_p^2 \cdot t_B} = \frac{1-\varepsilon}{\delta_{пл}}$ , тогда

$$\Xi_{яч.} = \xi_L \frac{(1-\varepsilon) \cdot U_\Gamma^3}{2 \cdot \delta_{пл} \cdot \varphi_{яч.}}, \quad (4.8)$$

где  $\varepsilon$  – объемная порозность насадки;  $\delta_{пл}$  – толщина пластины, м.

Подставляя выражение (4.8) в (3.14), получим уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в газовой фазе:

$$\beta_{zs} = B_z \left[ D_\Gamma^2 \cdot \frac{\xi_L (1-\varepsilon) \cdot U_\Gamma^3}{\delta_{пл} \cdot \varphi_{яч.} \cdot \nu_\Gamma} \right]^{1/4}, \quad (4.9)$$

где  $B_z = 6,22/(1-\varepsilon)^{1/4}$  - коэффициент пропорциональности, определяемый опытным путем.

Погрешность расчетных данных по уравнению (4.9) с экспериментальными данными (рисунки 4.3 и 4.4) составила  $\pm 12\%$ .

Для вихревой зоны с *трубчатой насадкой*

Мощность вихрей в ячейке:

$$N_b = \xi_L \cdot t_p \cdot \ell \cdot \rho_\Gamma \cdot \frac{U_\Gamma^3}{2}. \quad (4.10)$$

Объем газа в ячейке:

$$V_{г.яч.} = t_p \cdot \ell \cdot (t_B - h_{пл}) \cdot \varphi_{яч.} \quad (4.11)$$

В уравнениях (4.9) – (4.11):  $h_{nl} = \delta_{nl} \cdot (1 - \varepsilon_0)$  – пленочная составляющая КУЖ, м;  $U_z = W_z / \varphi_{яч}$  – истинная скорость газа в ячейке, м/с;  $\varphi_{яч} = 1 - \frac{h_k}{t_b} = 1 - \frac{h_0 - h_{nl}}{t_b}$  – газосодержание слоя в ячейке;  $h_k = h_0 - h_{nl}$  – капельная составляющая КУЖ, м.

В исследуемом диапазоне шагов между трубами по вертикали отношение  $t_b / h_{пл} > 10^3$ , поэтому пленочной составляющей в уравнении (4.11) пренебрегаем. Тогда это уравнение примет вид:

$$V_{z.яч} = t_p \cdot \ell \cdot t_b \cdot \varphi_{яч} \quad (4.12)$$

Преобразовывая уравнение (4.9) с учетом (4.10) и (4.12) имеем:

$$\Xi = \frac{\xi_L \cdot U_z^3}{2 \cdot \varphi_{яч} \cdot t_b} \quad (4.13)$$

Подставляя выражение (4.13) в (4.9), получим уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в газовой фазе:

$$\beta_{zs} = B_{\beta_{zs}} \cdot \left[ \xi_L \cdot \frac{D_z^2 \cdot U_z^3}{\varphi_{яч} \cdot t_b \cdot \nu_z} \right]^{1/4}, \quad (4.14)$$

где  $B_{\beta_{zs}} = 10,4 \left( \frac{\varphi}{1 - \varphi} \right)^{1/4}$  – коэффициент пропорциональности, определяемый опытным путем.

Погрешность расчетных данных коэффициентов массоотдачи в газовой фазе  $\beta_{zs}$  по уравнению (4.14) с экспериментальными составила  $\pm 11\%$ .

**Коэффициенты теплоотдачи** для вихревой ступени с пластинчатой и трубчатой насадкой.

Известно, что для осуществления переноса тепла и массы необходимо различие потенциалов в разных точках среды. Применительно к режимам работы тепломассообменных аппаратов в качестве потенциала для переноса тепла принимается температура, а для переноса массы (водяного пара) – парциальное давление водяных паров. Следовательно, разница температур отдельных точек среды обуславливает перенос тепла, а различие парциальных давлений – перенос массы [101].

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

Согласно [53 с.32] температурное поле в слое насыщенного газа не зависит от физических свойств среды, а полностью определяются формой рассматриваемого тела. Другими словами, тепло- и массообмен между жидкостью и газом при их непосредственном контакте автомодельны относительно чисел подобия, включающих только физические характеристики сред, в том числе относительно чисел Льюиса, Прандтля и др. В данном случае форма примыкающих друг к другу слоев насыщенного и ненасыщенного газа является одинаковой и для теплообмена и массообмена, уравнения переноса энергии и массы и краевые условия к ним для своих областей задания являются полностью тождественными друг другу относительно переменных температур и концентраций. Этим самым утверждается аналогия процессов тепло- и массообмена при непосредственном контакте газа и жидкости.

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

1) соответствие геометрического равенства границ тепла и массы;

2) соблюдение подобия изменения температур и парциальных давлений в сходственных точках аппарата, автором [101 с.35] отмечено сохранение постоянства отношения коэффициентов переноса тепла и массы:

$$\frac{\alpha}{\beta_d} = c_p'. \quad (4.15)$$

Тогда для вихревой зоны с пластинчатой насадкой

$$\alpha = 4,35/(1-\varepsilon)^{1/4} \cdot c_p' \cdot \left[ D_r^2 \cdot \frac{\xi_L(1-\varepsilon) \cdot U_r^3}{\delta_{пл} \cdot \varphi_{яч} \cdot \nu_r} \right]^{1/4} \quad (4.16)$$

с трубчатой насадкой

$$\alpha = 7,28 \cdot \left( \frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/4} \cdot c_p' \cdot \left[ \xi_L \cdot \frac{D_r^2 \cdot U_r^3}{\varphi_{яч} \cdot t_B \cdot \nu_r} \right]^{1/4} \quad (4.17)$$

### **Движение теплоносителя по трубам трубчатого пучка**

#### ***Гидравлическое сопротивление и коэффициенты теплоотдачи***

Известно, что гидравлическое сопротивление при движении теплоносителя по трубопроводам определяется потерями давления на трение и в местных сопротивлениях, а также зависят от его конфигурации. Наши исследования гидродинамических характеристик, процессов массообмена и теплообмена проведены на экспериментальной установке, технологическая схема которой показана на рисунке 2.1. Для данной конфигурации трубчатого пучка гидравлическое сопротивление может быть определено по формуле [31 с.85]:

$$\Delta p = \Delta p_1 + (z - 2) \cdot \Delta p_2 + z \cdot (\Delta p_3 + \Delta p_4 + n \cdot \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_5) + (z - 1) \cdot (\Delta p_6 + \Delta p_7 + \Delta p_8 + \Delta p_9) + \Delta p_{10}, \quad (4.18)$$

Здесь  $z$  – число ходов в трубчатом пучке;  $n = D_{\text{ап}}/t_p$  – количество труб в слое.

В формуле (4.18)  $\Delta p_1$  – потеря давления в тройнике, Па;  $\Delta p_2$  – потеря давления в колене, Па;  $\Delta p_3$  – потеря давления при выходе разделенного потока в коллектор, Па;  $\Delta p_4$  – потеря давления при выходе потока из коллектора в трубы пучка, Па;  $\Delta p_{\text{тр}}$  – потеря давления на трение в трубах теплообменника, Па;  $\Delta p_5$  – потери давления при входе потока из труб в коллектор, Па;  $\Delta p_6$  – потери давления при выходе потока из коллектора в отводы, Па;  $\Delta p_7$  – потери давления при движении жидкости по отводам, Па;  $\Delta p_8$  – потери давления при входе потока из отводов в коллектор, Па;  $\Delta p_9$  – потери давления при входе потока из коллектора в трубы тройника, Па;  $\Delta p_{10}$  – потери давления при входе потока из тройника в трубу, Па.

Гидравлическое сопротивление за счет местных сопротивлений в трубчатом пучке:

$$\Delta p_{\text{м.с}} = \Delta p_1 + (z - 2) \cdot \Delta p_2 + z \cdot (\Delta p_3 + \Delta p_4 + \Delta p_5) + (z - 1) \cdot (\Delta p_6 + \Delta p_7 + \Delta p_8 + \Delta p_9) + \Delta p_{10} \quad (4.19)$$

Гидравлическое сопротивление за счет потерь давления на трение:

$$\Delta p_{\text{м.с}} = z \cdot n \cdot \Delta p_{\text{тр}} \quad (4.20)$$

Потери давления в местных сопротивлениях рассчитывают соответственно по формуле:

$$\Delta p_i = \zeta_i \left( \frac{\rho \cdot w_i^2}{2} \right), \quad (4.21)$$

где  $\zeta_i$  – коэффициент местного сопротивления на рассматриваемом участке теплообменника [102,103];  $w_i$  – скорость жидкости в узком сечении рассматриваемого участка, м/с.

Потери давления на трение в трубах теплообменника [104]:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda_{\text{тр}} \frac{l}{d_{\text{в}}} \frac{\rho w_{\text{тр}}^2}{2} \quad (4.22)$$

где  $\lambda_{\text{тр}}$  – коэффициент трения;  $l$  – длина трубы, м;  $d_{\text{в}}$  – внутренний диаметр трубы, м;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $w_{\text{тр}}$  – скорость жидкости в трубах, рассчитываемая по площади свободного сечения одного хода, м/с.

Коэффициент трения  $\lambda_{\text{тр}}$  зависит как от режима течения потока, так и от шероховатости стенок труб или каналов.

При ламинарном режиме течения ( $Re < 2300$ )

$$\lambda_{\text{тр}} = 64/Re, \quad (4.23)$$

При турбулентном режиме течения, когда коэффициент трения существенно зависит от шероховатости труб, величину  $\lambda_{\text{тр}}$  можно рассчитать по формуле

$$\lambda_{\text{тр}} = 0,11 \left( \frac{10}{Re} + 1,16 \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}, \quad (4.24)$$

Для расчета среднего коэффициента теплоотдачи при движении теплоносителя в трубах в литературе имеются результаты исследований и полученные расчетные зависимости [105-107]. Нами приняты следующие критериальные уравнения:

*ламинарное течение*  
вязкостный режим

$$Nu_{\text{ж},d} = 0,15 \cdot Re_{\text{ж},d}^{0,33} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,43} \cdot \varepsilon_l; \quad (4.25)$$

вязкостно-гравитационный режим

$$Nu_{\text{ж},d} = 0,15 \cdot Re_{\text{ж},d}^{0,33} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,43} \times Gr_{\text{ж},d}^{0,1} \cdot \varepsilon_l; \quad (4.26)$$

*турбулентное течение*

$$Nu_{\text{ж},d} = 0,021 \cdot Re_{\text{ж},d}^{0,8} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,43} \cdot \varepsilon_l. \quad (4.27)$$

За определяющую температуру принята средняя температура жидкости; за определяющую скорость – средняя скорость жидкости в трубе; за определяющий размер – диаметр круглой трубы или *эквивалентный диаметр* трубы любой формы ( $d_{\text{экв}} = 4F/P$ , где  $P$  – внутренний периметр канала, м).

Эти формулы дают среднее значение  $\alpha$  при  $l/d > 50$ . Они применимы для любой жидкости. Для труб, имеющих длину  $l < 50 \times d$ , следует полученное значение  $\alpha$  умножить на средний поправочный коэффициент  $\varepsilon_l$ , величина которого приведена в [105 с.90].

**Эффективность пылеулавливания.** Известно, что в улавливание твердых частиц размером менее 0,1 мкм происходит вследствие молекулярной диффузии. В аппарате с регулярной насадкой реализуется турбулентный режим, поэтому при расчете эффективности осаждения в интенсивных режимах течения газа необходимо учитывать турбулентную диффузию, которая вносит существенный вклад в эффективность улавливания частиц с размером 1-2 мкм и более [13].

Коэффициент турбулентной диффузии частиц является функцией пульсационной скорости потока  $\bar{u}'$  и его определяющего размера  $\ell$  и не зависит от физических свойств потока [13,108]:

$$D_T \approx 0,7 \cdot \bar{u}' \cdot \ell, \quad (4.28)$$

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

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

$$D_T = 0,7 \cdot \bar{u}' \cdot \frac{\rho_{\text{ч}} \cdot d_{\text{ч}}^2 \cdot u_{\text{ч}}}{18\mu_T}. \quad (4.29)$$

здесь  $\bar{u}'$  – пульсационная скорость, м/с;  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность твердой частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $d_{\text{ч}}$  – диаметр частицы, м;  $u_{\text{ч}}$  – скорость движения частицы, м/с.

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

$$\bar{u}' = \mathfrak{E}^{1/3} \cdot \ell^{1/3}, \quad (4.30)$$

где  $\ell$  – масштаб пульсаций, соизмеримый с размером насадочных элементов, т.е.  $\ell = b$ .

Энергию диссипации вихрей  $\mathfrak{E}$ , образующихся при обтекании элементов насадки, определим как:

$$\mathfrak{E} = \frac{N_{\text{в}}}{V_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}}} \quad (4.31)$$

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

В зоне насадки преобладает вихревая структура слоя, и мощность потока определяется мощностью образующихся вихрей.

Для вихревой зоны с *пластинчатой насадкой* [109]

$$N_{\text{в}} = \xi_L \cdot b^2 \cdot n_{\text{э}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot \frac{u_{\text{г}}^3}{2}. \quad (4.32)$$

Для вихревой зоны с *трубчатой насадкой*

$$N_{\text{в}} = \xi_L \cdot d \cdot l \cdot n_{\text{э}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot \frac{u_{\text{г}}^3}{2}. \quad (4.33)$$

В уравнениях (4.32) и (4.33)  $\xi_L$  – коэффициент сопротивления орошаемой насадки;  $n_3$  – количество насадочных элементов в объеме рабочей зоны аппарата;  $u_r = W_r / \varepsilon_0$  – истинная скорость газа в ячейке, м/с.

Количество насадочных элементов может быть определено по формуле:

$$n_3 = n_p \cdot n_c, \quad (4.34)$$

в которой  $n_p = H/t_b$  – количество рядов насадки в аппарате;  $n_c$  – количество насадочных элементов в одном ряду (поперечном сечении аппарата).

Для пластинчатой насадки  $n_c = 0,785 \frac{D^2}{t_p^2}$ ;

Для трубчатой насадки  $n_c = 0,785 \frac{D^2}{t_p \cdot l}$ .

Объем жидкости определим по формуле:

$$V_{ж} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h_0. \quad (4.35)$$

Здесь  $D$  – диаметр аппарата, м;  $h_0$  – количество удерживаемой жидкости в аппарате, м.

Среднюю пульсационную скорость определим по приведенной зависимости (4.30). Преобразовывая данную зависимость с учетом (4.31), (4.32) и (4.35), уравнение для расчета пульсационной скорости в насадочной зоне примет вид:

$$\bar{u}' = \left( \frac{\xi_L}{2} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{b^2}{t_p} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{H}{t_b} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\rho_g}{\rho_{ж}} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{d_k}{h_0} \right)^{1/3} \cdot u_r. \quad (4.36)$$

С учетом средней пульсационной скорости  $u'$  уравнение (4.36), получим формулу для расчета коэффициента турбулентной диффузии:

$$D_T = B_T \cdot (\xi_L)^{1/3} \cdot (1 - \varepsilon_0)^{1/3} \cdot \left( \frac{H}{t_b} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\rho_r}{\rho_{ж}} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{1}{h_0} \right)^{1/3} \cdot d_k^{4/3} \cdot u_r \cdot Stk, \quad (4.37)$$

где  $Stk = \frac{\rho_c \cdot d_c^2 \cdot u_c}{18\mu_r \cdot d_k}$  – критерий Стокса;

$B_T = 8,38 \cdot (1 - \varphi)$  – корректирующий коэффициент для пластинчатой насадки;

$B_T = 4 \cdot 10^{-2}$  – корректирующий коэффициент для трубчатой насадки.

Эффективность пылеулавливания насадочной зоны определяется по формуле:

для вихревой зоны с пластинчатой насадкой



$$\eta_D = 2,97 \cdot \left( \frac{W_r \cdot d_k}{D_r} \right)^{-1/4} \quad (4.38)$$

для вихревой зоны с трубчатой насадкой (составляющая эффективности пылеулавливания за счет турбулентной диффузии)

$$\eta'' = 3,55 \cdot \left( \frac{W_r \cdot d_k}{D_r} \right)^{-1/4} \quad (4.39)$$

Диаметр капель рассчитывают по формуле [110]:

$$d_k = B_k \cdot \xi_L^{1/3} \frac{\rho_{ж}^{1/6} \cdot \sigma^{1/3} \cdot d_{cmp}^{2/3} \cdot U_r}{\rho_r^{1/2} \cdot U_{cmp}^{5/3}}, \quad (4.40)$$

где  $B_k$  опытный коэффициент для пластинчатой насадки  $B_k=1,54$ ; для трубчатой насадки  $B_k=0,07$ .

#### 4.4.2 Расчет ступени ударного взаимодействия газа и жидкости и центробежного осаждения твердых частиц

##### Ударное взаимодействие газа и жидкости.

Для аппарата с трубчатой насадкой гидравлическое сопротивление определяется по формуле:

$$\Delta P_{ап} = \Delta P_э + \Delta P_{н.п.} + \Delta P_L, \quad (4.41)$$

где  $\Delta P_э$  - гидравлическое сопротивление зоны эжекции, Па;  $\Delta P_{н.п.}$  - гидравлическое сопротивление в зоне выхода газового потока из центральной трубы, Па;  $\Delta P_L$  - гидравлическое сопротивление насадочной зоны, Па (уравнение (1.1)).

Гидравлическое сопротивление зоны эжекции рассчитывают по уравнению (1.46):

$$\Delta P_э = \lambda \frac{\rho_r \cdot W_{пар}^2}{2} + \rho_{ж} g [(1 - \varphi_э) \Delta h],$$

где  $\Delta h$  - количество вытесненной в насадочную зону жидкости, определяют по формуле (1.47):

$$\Delta h = h_1 + h_d,$$

где  $h_1$  - зазор между срезом газового патрубка и зеркалом жидкости, м;  $h_d$  - динамический уровень жидкости, определяемый скоростным напором газового потока, м.

Величину  $h_d$  рассчитывают по формуле (1.48):

$$h_d = \lambda \frac{W_{\text{пат}\square}^2}{2g},$$

где  $\lambda$  - опытный коэффициент (коэффициент сопротивления патрубка  $\lambda = \xi_{\text{пат}}$ ), значение которого определяют по следующей зависимости (1.49):

$$\lambda = \frac{3,15}{\text{Re}_{\text{пат}\square}^{0,5}},$$

здесь  $\text{Re}_{\text{пат}\square} = \frac{W_{\text{пат}\square} \cdot d_{\text{пат}\square}}{\nu_r}$  - число Рейнольдса;  $W_{\text{пат}}$  - скорость газового потока в патрубке, м/с;  $d_{\text{пат}}$  - диаметр патрубка, м.

Газосодержание в зоне эжекции  $\phi_3$  определяют по уравнению (1.50):

$$\phi_3 = 1 - \frac{1}{1 + \sqrt{Fr}},$$

где  $Fr$  - модифицированное число Фруда (1.51):

$$Fr = \frac{\rho_r \cdot W_{\text{пат}\square}^2}{2\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot \Delta h}.$$

Гидравлическое сопротивление в зоне выхода газового потока из зоны эжекции:

$$\Delta P_{\text{н.п.}} = \zeta \cdot \frac{\rho_z \cdot w_k^2}{2}, \quad (4.42)$$

где  $\zeta = 0,5 \left(1 - \frac{F_{\text{ан}}}{F_{\text{к}}}\right)^{3/4}$  - коэффициент сопротивления [102] при  $\text{Re} > 10^4$ ;  $F_{\text{ан}}$  - площадь сечения аппарата, м<sup>2</sup>;  $F_{\text{к}}$  - площадь кольца между выходным патрубком и колпаком, м<sup>2</sup>;  $w_k$  - скорость газа в кольцевом зазоре, м/с.

Суммарная эффективность процесса пылеулавливания в аппарате с трубчатой насадкой рассчитывают по формуле (1.56):

$$\eta_{\text{общ}} = 1 - (1 - \eta_{\text{stk}})(1 - \eta_{\text{D}}),$$

где  $\eta_{\text{stk}}$  и  $\eta_{\text{D}}$  - эффективность улавливания частиц за счет инерционного и диффузионного осаждения, соответственно.

Эффективность пылеулавливания за счет инерционного механизма

рассчитывают по формуле (1.57):

$$\eta_{Stk} = 1 - \exp \left( -\frac{3}{2} \cdot \frac{m_y \cdot K_3 \cdot \vartheta_{отн} \cdot t_B}{U_K \cdot d_K} \right),$$

где  $m_y = \frac{V_{ж}}{V_r}$  – величина удельного орошения, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\vartheta_{отн} = (u_{ч} - u_{к})$  – скорость осаждения частиц на капли, м/с;  $u_{к}$  – скорость движения капель, м/с;  $d_k$  – диаметр капель, м;  $K_3$  – коэффициент захвата.

Коэффициент захвата рассчитывают по уравнению (1.58):

$$K_3 = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,25)^2} \cdot \left( e^{-5,1 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{d_k}{d_q}} - e^{-4,5 \frac{\ell_k}{d_k}} \right),$$

где  $Stk = \frac{\rho_r \cdot d_q \cdot u_{ч}}{18 \mu_r \cdot d_k}$  – критерий Стокса;  $\mu_r$  – динамическая вязкость газа, Па·с;  $d_q$

– диаметр частиц, м;  $\ell_k = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_r - \rho_{ж})}}$  – капиллярная постоянная, м;  $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м.

Эффективность пылеулавливания за счет диффузионного осаждения рассчитывают по формуле (1.59):

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

где  $\eta'$  и  $\eta''$  – эффективность пылеулавливания зоны эжекции и насадочной зоны.

Эффективность пылеулавливания зоны эжекции рассчитывают по формуле (1.60):

$$\eta'' = B'_k \cdot \left( \frac{W_{пар} \cdot d_{k_1}}{D'_r} \right)^{-1/4},$$

где  $B'_k = 5,5$  – опытный коэффициент.

Эффективность пылеулавливания насадочной зоны по формуле (1.61).

Входящие в выражения (1.60) и (1.61) коэффициент турбулентной диффузии для зоны эжекции рассчитывают по уравнению (1.62):

$$D'_{T \square} = B_1 (\xi_{пар})^{1/3} \cdot \left( \frac{\rho_r}{\rho_{ж}} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{1}{\Delta h} \right)^{1/3} \cdot d_{k_1}^{4/3} \cdot W_{пар \square} \cdot Stk;$$

где  $B_1 = 2 \cdot 10^{-2}$  – коэффициент.

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

$$d_{k_1} = 5,42 \cdot \frac{\sigma^{3/5} \cdot (1 - \varphi_3)^{2/5} \Delta h^{2/5}}{\rho_{ж}^{1/5} \cdot \rho_{г}^{2/5} \cdot W_{пат}^{6/5}}. \quad (4.43)$$

### Ступень центробежного осаждения твердых частиц

**Гидравлическое сопротивление** циклонно-вихревого аппарата определим, исходя из аддитивности сопротивлений зоны действия центробежной силы и насадочной зоны [96,111]:

$$\Delta P_{ан} = \Delta P_{ц} + \Delta P_L, \quad (4.44)$$

где  $\Delta P_{ц}$  - гидравлическое сопротивление зоны действия центробежной силы, Па;  
 $\Delta P_L$  - гидравлическое сопротивление насадочной зоны, Па.

Гидравлическое сопротивление циклонной ступени определяется по уравнению [112]:

$$\Delta P_{ц} = \Delta P_{вх} + \Delta P_{кольц} + \Delta P_{вых}, \quad (4.45)$$

где  $\Delta P_{вх}$  - гидравлическое сопротивление входного участка, Па;

$\Delta P_{кольц}$  - гидравлическое сопротивление кольцевой зоны, Па;

$\Delta P_{вых}$  - гидравлическое сопротивление выходного участка, Па.

Гидравлическое сопротивление входного участка:

$$\Delta P_{вх} = \xi_{вх} \cdot \frac{\rho_{г} \cdot w_{вх}^2}{2}, \quad (4.46)$$

где  $\xi_{вх} = 3,32$  – коэффициент сопротивления при входе газа;  $w_{вх}$  – скорость газа на входе, м/с.

Гидравлическое сопротивление кольцевой зоны:

$$\Delta P_{кольц} = \xi_{кольц} \cdot \frac{\rho_{г} \cdot w_{кольц}^2}{2}, \quad (4.47)$$

где  $\xi_{кольц} = 4,1$  – коэффициент сопротивления при прохождении кольцевого зазора;  $w_{кольц}$  – скорость газа в кольцевом зазоре, м/с.

Гидравлическое сопротивление выходного участка:

$$\Delta P_{вых} = \xi_{вых} \cdot \frac{\rho_{г} \cdot w_{вых}^2}{2}, \quad (4.48)$$

где  $\xi_{вых} = 5,7$  – коэффициент сопротивления при выходе газа;  $w_{вых}$  – скорость газа на выходе, м/с.

Осаждение частиц в циклонной (сухой) ступени циклонно-вихревого аппарата происходит за счет суммарного действия двух механизмов: центробежного, перемещающего частицы к стенкам аппарата и инерционного, способствующего снижению скорости и осаждению частиц.

Рассмотрим более подробно действие механизмов улавливания частиц. Для вывода уравнения, описывающего центробежное осаждение частиц пыли в сухой ступени применим метод, предложенный Лайтом и Лифом [113-115]. Этот подход использован нами также для расчета двухступенчатого вихревого пылеуловителя [116].

**Эффективность пылеулавливания** может быть определена по формуле:

$$\eta_c = 1 - \exp[-2(C_k \cdot \psi)^{1/(2n+2)}], \quad (4.49)$$

где  $C_k$  – коэффициент, зависящий от конструктивных соотношений сухой ступени аппарата.

Для сухой ступени коэффициент  $C_k$  рассчитывается по уравнению [111]:

$$C_k = \frac{\pi \cdot D_u^2}{a \cdot \epsilon_1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d}{D_u} \right)^2 \right] \cdot \left( \frac{2 \cdot h_T}{D_u} - \frac{h_0}{D_u} \right) + \left[ \left( \frac{d}{D_u} \right)^2 - \left( \frac{d_1}{D_u} \right)^2 \right] \cdot \left( \frac{4 \cdot H_u}{D_u} + \frac{4 \cdot H_k}{D_u} \right) \quad (4.50)$$

Значения конструктивных соотношений в уравнении (4.50):

$$a = 0,66 \cdot D_u; \quad \epsilon_1 = 0,26 \cdot D_u; \quad d = 0,59 \cdot D_u; \quad d_1 = 0,4 \cdot D_u; \quad h_T = 1,74 \cdot D_u; \quad h_0 = 0,3 \cdot D_u; \\ H_u = 2,26 \cdot D_u; \quad H_k = 2 \cdot D_u \quad [111]$$

Величина  $\psi$  в уравнении (4.49) представляет собой модифицированный инерционный параметр, характеризующий состояние пылегазовой смеси [28 с.204 ]:

$$\psi = \frac{d_u^2 \cdot \rho_u \cdot W_{вх}}{18 \mu_r \cdot D_{ц}} (n+1), \quad (4.51)$$

где  $W_{вх}$  – скорость газа на входе в сухую ступень, м/с.

Величина  $n$  в уравнениях (4.49) и (4.51) согласно [13,113], составляет:

$$n = 1 - (1 - 0,0165 \cdot D_{ц}^{0,14}) \cdot \left( \frac{T_r}{283} \right)^{0,3}. \quad (4.52)$$

Здесь  $T_r$  – абсолютная температура газов,  $^{\circ}\text{K}$ .

В работе [117] приведены уравнения для расчета времени осаждения и предельного размера осаждаемых дисперсных частиц в аппарате циклонного типа.

## 5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗООЧИСТНЫХ АППАРАТОВ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

### 5.1 Рекомендации по проектированию и эксплуатации промышленных аппаратов

На основании полученных нами результатов исследований, материалов исследований и предлагаемых оптимальных значений режимных и конструктивных параметров учеными, занимающимися изучением тепломассообменного и пылеулавливающего оборудования с подвижной и регулярной насадкой [17,28,30,31,118] нами разработаны рекомендации по проектированию и эксплуатации газоочистных аппаратов.

Для насадочной зоны (вихревой ступени контакта) **одноступенчатых и двухступенчатых 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.

*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  $L=15-25$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч, для плохо растворимых газов  $L=50$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч и выше. Необходимо отметить, что аппараты с регулярной подвижной насадкой также хорошо зарекомендовали себя при плотностях орошения  $L=100$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч и выше.

*Скорость теплоносителя в трубах  $w_T$ .* Рекомендуемая скорость движения теплоносителя в трубах составляет  $w_T=0,1-0,5$  м/с.

*Основные характеристики насадки и струн.* Пластинчатая насадка изготавливается из квадратных пластин размером 50x50 мм или 100x100 мм. Толщина пластин 1- 2мм. Пластины закрепляют на струнах, выполняемых из проволоки диаметром 2-5мм.

Размеры труб для трубчатой насадки: труб  $D_y=40$  мм,  $D_n=45$  мм;  $D_y=50$ мм,  $D_n=57$ мм; коллекторов  $D_y=65$ мм,  $D_n=76$ мм;  $D_y=80$ мм,  $D_n=89$ мм.

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

*Шаг расположения насадочных элементов в вертикальном  $t_v/b$  и радиальном  $t_r/b$  направлениях.* Оптимальными шагами расположения пластинчатых и трубчатых насадочных элементов в вертикальном направлении при которых достигаются режимы одновременного вихреобразования (синфазные режимы) являются  $t_v/b=2$  и 4. Вместе с тем выполнение насадочной зоны с шагом расположения  $t_v/b=4$  приводит к увеличению высоты насадочной зоны, что не всегда целесообразно.

Оптимальным шагом в радиальном направлении является  $t_r/b=2$ . При  $t_r/b<2$  значительно вырастают энергозатраты, а при  $t_r/b>2$  (и вплоть до  $3b$ ) эффективность проведения процессов и энергозатраты снижаются

незначительно, тогда как габариты насадки в радиальном направлении увеличиваются.

*Количество секций в насадочной зоне.* Минимальная высота насадочной зоны составляет 1 м. Если при заданных исходных данных высота секции в 1 м (до 5 рядов насадки) 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 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.

*Каплеуловитель.* Он устанавливается в тех случаях, когда рабочая скорость газа в аппарате превышает 4,5 м/с [18 с.171]. Конструкция каплеуловителя подбирается исходя из количества жидкости, уносимой из аппарата и ограничений по гидравлическому сопротивлению. Выбор осуществляется по справочной литературе [11 с.139, 12 с.345, 119].

Для зоны ударного взаимодействия газа и жидкости **аппарата с двухсторонним подводом газового потока и двухступенчатого аппарата:**

*Исходный уровень жидкости (зазор между срезом патрубка и зеркалом жидкости)  $h_1$ .* Рекомендуется принимать  $h_1$  в пределах  $0 \div 0,02$  м.

*Диаметр входного патрубка  $d_{nam}$*  выбирается из условия  $w_{nam} = 3 \cdot w_2$  (здесь  $w_{nam}$  – скорость газа в патрубке;  $w_2$  – скорость газа в насадочной зоне аппарата).

*Отношение диаметров зоны ударного взаимодействия и диаметра аппарата  $D_{з.у}/D_{ап} = 2$*  (для двухступенчатого аппарата).

Для зоны центробежного осаждения твердых частиц **аппарата циклонно – вихревого действия.**

*Конструктивные параметры* ступени центробежного осаждения твердых частиц аппарата циклонно-вихревого действия рассчитываются исходя из рекомендуемых соотношений [118 с.46].

## **5.2 Промышленные испытания аппарата циклонно-вихревого действия в технологической схеме очистки газов, отходящих от сушилки КС в производстве сульфата хрома**

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  $\text{CrO}_3$  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 [3 с.247, 120].

Технологический процесс производства сульфата хрома содержит следующие стадии:

1 прием серы технической в цех, подача серы в печь, сжигание ее, с образованием сернистого газа, охлаждение сернистого газа;

2 прием бихроматного раствора из цеха №3, разбавление его и подача на ПГУУ, очистки отработанных газов схемы восстановления;

3 восстановление бихроматного раствора сернистым газом, получение раствора основного сульфата хрома;

4 корректировка раствора сульфата хрома бихроматом натрия, сахаром или бисульфитом натрия (при необходимости);

5 сушка;

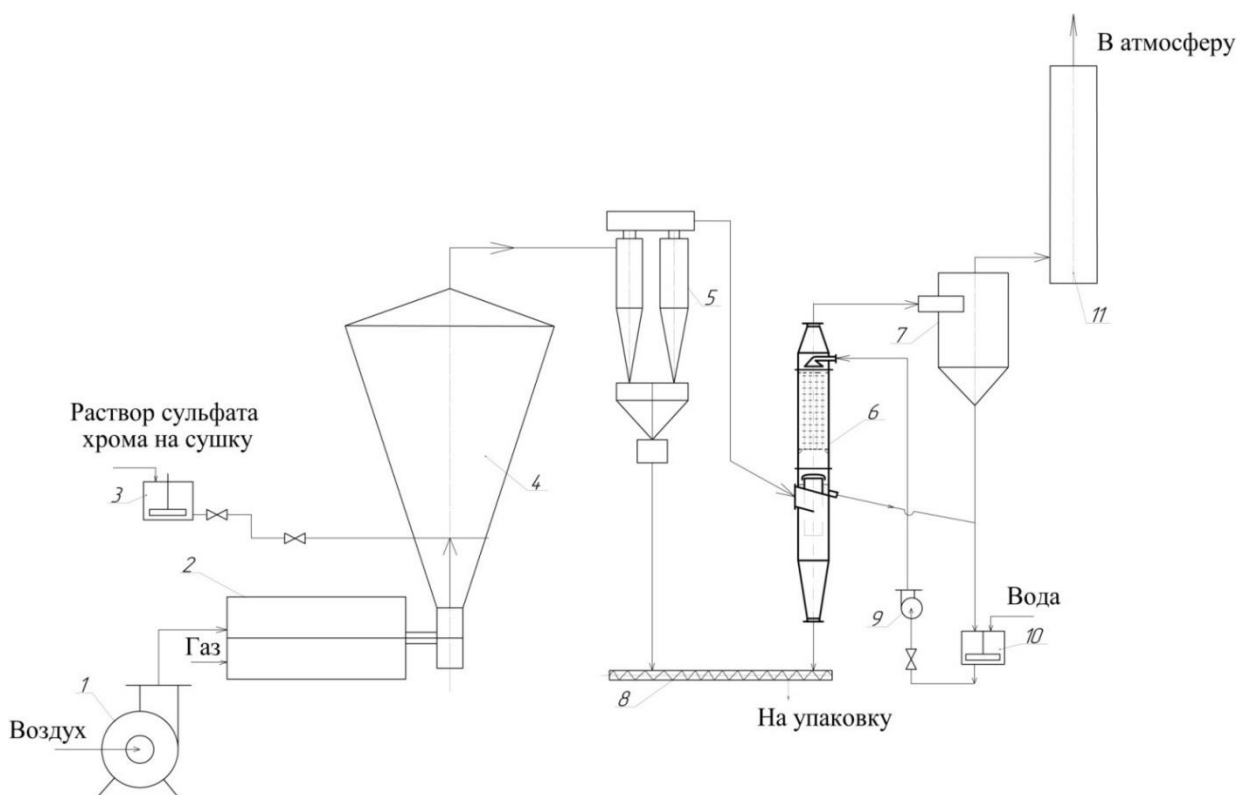
6 упаковка продукта, складирование и отгрузка потребителю;

7 приготовление раствора бисульфита натрия;

8 обеспечение котла-утилизатора питающей водой, подогрев и подача воздуха в печь окисления серы;

9 переработка несоответствующей продукции.

Работы по внедрению циклонно-вихревого аппарата проведены на 5-й стадии в схеме очистки отходящих газов от сушилки «КС» (рисунок 5.1).



- 1 – дымосос; 2 – топка; 3 – питатель сушилки КС; 4 – сушилка КС; 5 – группа из 6-ти циклонов; 6 – циклонно-вихревой аппарат; 7 – ловушка; 8 – шнек; 9 – насос; 10 – бак орошения; 11 – санитарная труба.

Рисунок 5.1 – Технологическая схема очистки газов, отходящих от сушилки кипящего слоя в производстве сульфата хрома



Из бака-питателя 3 сиропообразный раствор сульфата хрома с концентрацией по  $\text{CrO}_3$  (380-415) г/л через форсунку подается в сушилку «кипящего слоя» 4. Сушилка «КС» представляет собой полуемкость 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 2 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  $(145-155)^{\circ}\text{C}$ . Температура в слое  $(70-75)^{\circ}\text{C}$ . Высушенный сульфат хрома вместе с парогазовой смесью дымососом Д-12 1 протягивается через группу циклонов 5, 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 (до реконструкции) проходила орошаемый водой скруббер и ловушку 7, затем выбрасывалась через санитарную трубу 11 в атмосферу. На орошение скруббера использовалась техническая вода. По достижении концентрации (110-120)г/л по  $\text{CrO}_3$  растворы из баков орошения сушилок, откачиваются в бак-сборник, откуда по мере необходимости перекачиваются в бак орошения.

Воздух в сушилку «КС» подается воздуходувкой 1. Часть воздуха идет на форсунку, как «первичный» для сгорания газа, остальной воздух подается непосредственно в топку 2 для разбавления и охлаждения топочных газов.

Во время обследования 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 ( $C_{\text{норм.}}=0,174\text{ г/нм}^3$ ).

В реконструируемой схеме очистки орошаемый скруббер заменен на циклонно-вихревой аппарат 6.

Циклонно-вихревой аппарат работает следующим образом.

Газовый поток, поступающий на очистку, подается через штуцер, установленный тангенциально в нижней части аппарата. При тангенциальном подводе газового потока возникает центробежная сила, которая воздействует на твердые частицы пыли, прижимая их к внутренней стенке аппарата. Под действием силы тяжести твердые частицы пыли сползают в коническое днище нижней ступени контакта и выводятся из аппарата через нижний патрубок.

Очищенный от пыли газовый поток через нижний срез центральной трубы поступает в верхнюю ступень контакта. При входе в нее центральная труба снабжена колпаком для исключения попадания стекающей орошающей жидкости.

Нижняя и верхняя ступени контакта разделены наклонной перегородкой, вследствие чего работа их происходит автономно.

Работа верхней ступени контакта происходит в противоточном режиме. В этом случае, поступающий снизу газовый поток, взаимодействует с орошающей жидкостью, подаваемой через ороситель в объеме насадочной зоны. Расположение насадочных элементов на струнах выполнено с шагом 2 калибра насадочного тела (для пластин). Этот шаг обеспечивает достижение режима одновременного вихреобразования (синфазного режима). Режим одновременного вихреобразования характеризуется совпадением времени образования вихрей за насадочными телами и временем движения образованных вихрей за цепочкой насадочных тел, расположенных по ходу движения газового потока. В момент подлета происходит взаимодействие подлетевших и завершивших цикл формирования вихрей за насадочными телами. В результате такого взаимодействия суммарная мощность вихрей увеличивается, что позволяет совершить большую работу по дроблению орошающей жидкости и созданию высокоразвитой межфазной поверхности.

Очищенный газовый поток выводится из аппарата через выходной патрубок. Отработанная жидкость в верхней ступени через патрубок выводится из аппарата.

Во время испытаний реконструированной технологической схемы, проводимых совместно сотрудниками ЮКУ им. М.Ауэзова и АО «АЗХС» (приложение Г), получены данные исследований. Диапазоны изменения замеров основных параметров газового потока при прохождении газоочистного оборудования показали, что:

До группы циклонов

- температура газа 61-65<sup>0</sup>С;
- давление (350-460) Па;
- расход газа 6780-7760 нм<sup>3</sup>/ч;
- средняя концентрация пыли 8,0 г/нм<sup>3</sup>.

После группы циклонов

- температура газа 58-63<sup>0</sup>С;
- давление (480-510) Па;
- расход газа 8100-8770 нм<sup>3</sup>/ч;
- средняя концентрация пыли 2,405 г/нм<sup>3</sup>.

После циклонно-вихревого аппарата

- температура газа 43-52<sup>0</sup>С;
- давление (160-200) Па;
- расход газа 10630-11770 нм<sup>3</sup>/ч;
- средняя концентрация пыли 0,029 г/нм<sup>3</sup>.

В результате проведенных испытаний подтверждена возможность эффективного улавливания пыли из газовых выбросов в циклонно-вихревом аппарате.

Циклонно-вихревой аппарат внедрен в технологической схеме очистки газов, отходящих от сушилки КС в производстве сульфата хрома (приложение Д).

По результатам проведенных испытаний проведен расчет эффективности природоохранных мероприятий по защите атмосферы от загрязнений в производстве сульфата хрома (акт внедрения от 24.12.2018 года) (приложение Е). Нормативные показатели по пыли составляют  $C_{\text{норм}}=0,408$  г/с. Замеры концентрации пыли после группы циклонов показали среднее значение  $C_{\text{гр.цик}}=5,64$  г/с. Экономическая оценка ущерба составляет 47,9 млн.тенге.

В существовавшей схеме с использованием орошаемого полого скруббера достигается снижение концентрации выбросов до  $C_{\text{скруб}}=0,67$  г/с и уменьшение ущерба до 23,7 млн.тенге.

После внедрения циклонно-вихревого аппарата снижение концентрации пыли произошло до  $C_{\text{цик.вихр}}=0,088$ г/с, что в 4,6 раза ниже нормативных показателей.

Снижение концентрации выбрасываемой пыли ниже нормативных показателей практически не наносит ущерба окружающей среде.

### **5.3 Промышленные испытания двухступенчатого комбинированного газоочистного аппарата с регулярной трубчатой насадкой в схеме очистки газов, отходящих от прокалочной печи в производстве окиси хрома металлургической**

Метод производства окиси хрома металлургической основан на реакции образования гидратированной окиси хрома (ГОХ) из монохромата натрия и серы в растворе при нагреве до (140 - 150 °С) и давлении 0,4- 0,6 МПа в автоклаве [3 с.220, 120]. Реакция идет в щелочной среде и с избытком серы против расчетно необходимого количества. При этом часть щелочи поглощается осадком гидроокиси хрома, а избыток введенной в процесс серы растворяется с образованием серосодержащих соединений- полисульфидов и тиосульфата натрия. При обработке указанной смеси дополнительным количеством монохромата натрия, полисульфиды окисляются с образованием гидроокиси хрома и тиосульфата натрия. Для того, чтобы превратить гидроокись хрома в окись хрома, ее подвергают высокотемпературному нагреву в прокалочной печи. Одновременно в печи идет реакция образования монохромата натрия и окисление тиосульфата натрия до сульфата натрия. Как видно из описанного метода, адсорбированная мелочь и неотмытые соли натрия переходят в окислительной среде в хромат и сульфат натрия, которые затем выщелачивают из спека. В дальнейшем пульпа окиси хрома фильтруется, сушится и упаковывается в качестве товарного продукта.

Технологическая схема очистки газов, отходящих от прокалочной печи, включает следующие процессы.

Из баков дозаторов паста ГОХ пневмодозаторами через питательную форсунку подается в прокалочную печь. При наличии в пасте элементарной серы, она выгорает в печи с образованием сернистого газа.

Прокалочная печь обогревается топочными газами от сжигания природного газа. В прокалочной печи при температуре (1200 - 1400) °С происходит полное обезвоживание гидроокиси хрома и перевод адсорбированной щелочи в хромат

натрия. Одновременно неотмытый тиосульфат натрия окисляется до сульфата натрия. Первоначально в схеме очистки, отходящие газы, содержащие пыль, из печи поступали на очистку в полые скруббера, орошаемые с помощью эвольвентных форсунок фильтратом 1,2 стадий фильтрации ГОХ. Фильтрат поступал в баки орошения скрубберов печей из баков- сборников фильтрата.

С увеличением концентрации, пульпа из баков орошения ПГУУ печей откачивалась через приемный бак- гаситель в отстойники «Дорра». Осветленная часть из отстойников «Дорра» поступает в бак- сборник осветленных растворов, откуда насосом откачивают на контрольную фильтрацию на фильтр- пресс. Образующийся после контрольной фильтрации технологических растворов шлам, поступает в бак шламооткачки. Твердая часть из отстойников «Дорра» и фильтр- прессы подается в бак доработки пульпы ГОХ.

Обследование существующей схемы очистки показали следующие предельные значения рабочих параметров: расход газа на входе в скруббера 24400÷31580 $\text{м}^3/\text{ч}$ ; температура газа – на входе 76-82 $^{\circ}\text{C}$ ; концентрация улавливаемых компонентов: пыль неорганическая – 1,03÷1,94 $\text{г}/\text{с}$ ;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 0,926-2,47  $\text{г}/\text{с}$ ;  $\text{CrO}_3$ - 0,0012- 0,014  $\text{г}/\text{с}$ ; оксид углерода- 0,92- 0,98  $\text{г}/\text{с}$ ; диоксид азота - 0,014-0,18  $\text{г}/\text{с}$ . Результаты обследований показали невысокую эффективность полых форсуночных скрубберов. Для увеличения степени очистки рекомендовано реконструировать существующую технологическую схему. В процессе реконструкции схемы очистки газов, отходящих от прокалочной печи, были убраны два полых скруббера, а взамен установлен инерционно- турбулентный аппарат (ИТА) [20 с.120].

Аппарат ИТА включает две контактные зоны. Поступающий на очистку газ входит в нижнюю часть аппарата через входной патрубок, расположенный над зеркалом жидкости. Имея повышенную скорость, запыленный газовый поток ударяется о поверхность жидкости, в результате чего твердые частицы выпадают и оседают в жидкости. Уровень орошающей жидкости в нижней части аппарата поддерживается постоянным.

Вторая зона контакта по ходу движения газового потока отделена от зоны ударного взаимодействия газа и жидкости наклонной перегородкой с патрубками для прохода газа. Эта контактная зона снабжена регулярной пластинчатой насадкой и оросителем в верхней части аппарата для обеспечения противоточного взаимодействия частично очищенного газового потока с орошающей жидкостью. Орошение контактных зон производится автономно. При этом в качестве орошающей жидкости используется фильтрат 1,2 стадий фильтрации ГОХ.

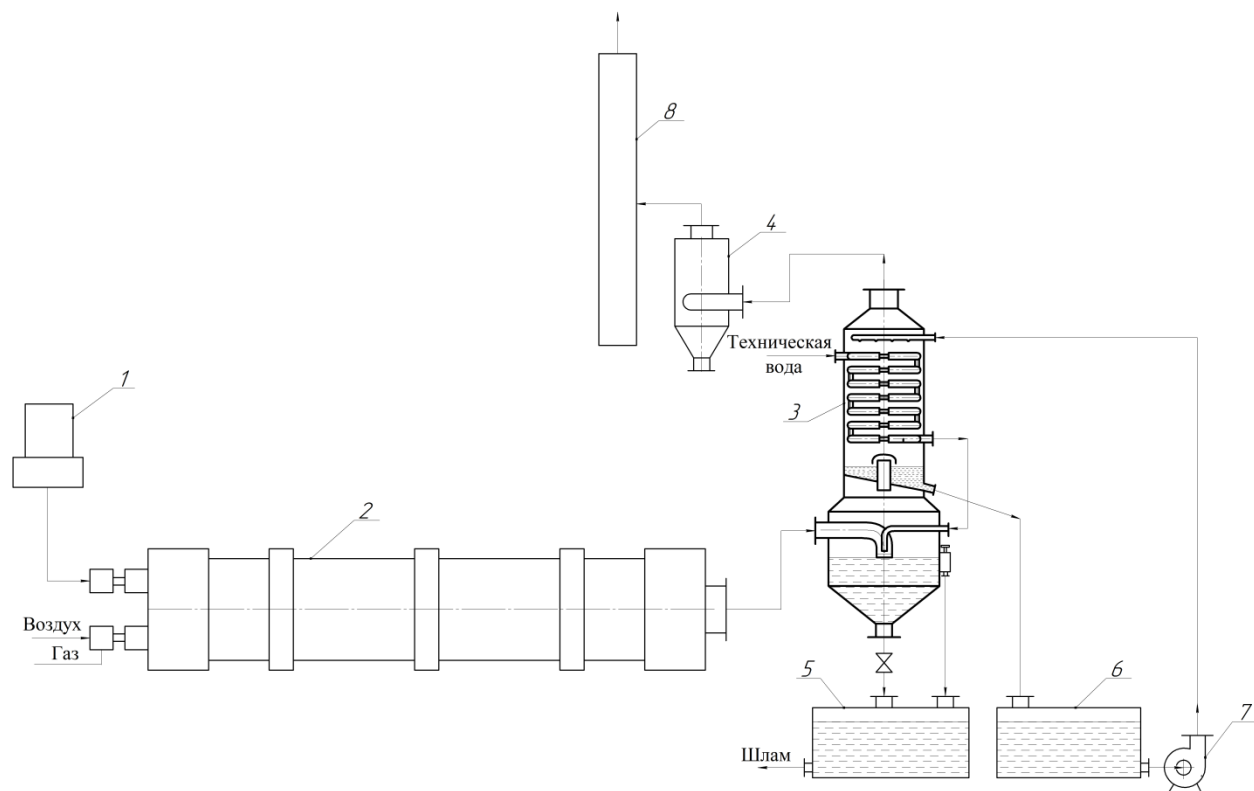
Аппарат ИТА позволяет реализовать два механизма улавливания твердых частиц: ударный и диффузионный, а также диффузионный механизм абсорбции газообразных продуктов. При этом обеспечивается автономное орошение контактных зон.

Результаты, полученные при испытании имели следующие предельные значения параметров: расход газа на входе в аппарат 22900÷31750 $\text{м}^3/\text{ч}$ ; температура газа – на входе 77-84 $^{\circ}\text{C}$ ; концентрация улавливаемых компонентов:

пыль неорганическая –  $0,068 \pm 0,0805$  г/с;  $Cr_2O_3$  –  $0,0012 - 0,0024$  г/с;  $CrO_3$  –  $0,0004 - 0,0009$  г/с; оксид углерода –  $0,038 - 0,057$  г/с; диоксид азота –  $0,004 - 0,0057$  г/с. Полученные данные показали высокую эффективность очистки улавливаемых компонентов и сравнительно низкие энергозатраты.

С целью снижения температуры очищаемого газового потока и дальнейшего повышения эффективности газоочистного аппарата было предложено модернизировать насадочную зону и узел подачи газового потока в аппарат.

Модернизированная технологическая схема очистки газов, отходящих от прокалочной печи, представлена на рисунке 5.2.



- 1 – питатель; 2 – прокалочная печь; 3 – аппарат ударно - вихревого действия с регулярной трубчатой насадкой (АУВД с РТН); 4 – каплеуловитель; 5 – сборник отработанной технической воды; 6 – сборник тиосульфатного фильтрата; 7 – насос; 8 – выхлопная труба.

Рисунок 5.2- Технологическая схема очистки газов, отходящих от прокалочной печи

Работа схемы очистки газов происходит следующим образом. Запыленный газовый поток из прокалочной печи 2 поступает в нижнюю часть аппарата ударно - вихревого действия с регулярной трубчатой насадкой (АУВД с РТН) 3, где за счет удара газового потока о зеркало жидкости улавливается основное количество пыли. В дальнейшем производится доочистка пыли и улавливание газообразных компонентов в насадочной зоне аппарата. Очищенный газовый поток через каплеуловитель 4 и выхлопную трубу 8 выбрасывается в атмосферу.

В качестве теплоносителя в трубчатом пучке используется техническая вода, которая в дальнейшем используется для поддержания необходимого уровня в нижней ступени аппарата. Слив отработанной жидкости осуществляется через переливное устройство, находящееся на боковой стенке корпуса нижней ступени, а также периодический слив шлама через штуцер в днище нижней ступени. Слив отработанной технической воды осуществляется в сборник 5. Циркуляция тиосульфатного фильтрата осуществляется через сборник 6 с помощью насоса 7.

В ранее установленном аппарате регулярная пластинчатая насадка была заменена на трубчатый пучок, установленный внутри корпуса и представляющей собой коллекторы для сбора и перераспределения жидкости в виде кольца с решеткой из труб. Перетекание теплоносителя от одного коллектора к другому осуществляется через вертикальные трубы. Такое исполнение трубчатой насадки обеспечивает максимальное использование закономерностей взаимодействия вихрей, заключающееся в достижении режима одновременного вихреобразования (синфазного режима). Жидкость в трубчатом пучке, используемая в качестве теплоносителя (техническая вода), не взаимодействует с поглотительным раствором, орошающим трубчатый пучок. Вместе с тем за счет контакта через стенки труб теплоноситель в трубах отнимает избыточное тепло газожидкостного потока, тем самым снижая температуру газового потока.

Модернизация узла подачи газового потока в аппарат заключалась в том, что в газоподводящем патрубке в зоне выхода газа соосно устанавливается штуцер, через который подается теплоноситель из нижнего коллектора трубчатой насадки, расположенной в верхней ступени контакта. Объединенный поток газа и теплоносителя с высокой скоростью ударяется о поверхность жидкости, находящейся в нижней части аппарата. При ударе содержащиеся в газовом потоке твердые частицы за счет сил инерции осаждаются в жидкости. Введение теплоносителя через входной газовый патрубок обеспечивает необходимую подпитку для поддержания заданного уровня жидкости относительно нижнего среза входного патрубка в нижней части аппарата. Кроме того, организация подачи теплоносителя в зону ударного взаимодействия способствует постоянному контакту запыленного газового потока со свежей жидкостью.

Результаты, полученные при испытании имели следующие предельные значения параметров: расход газа на входе в аппарат  $23100 \div 31980 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; температура газа – на входе  $75\text{-}88^\circ\text{C}$ ; температура газа – на выходе  $60\text{-}72^\circ\text{C}$ ; концентрация улавливаемых компонентов: пыль неорганическая –  $0,058 \div 0,068 \text{ г/с}$ ;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  –  $0,00102\text{-} 0,002 \text{ г/с}$ ;  $\text{CrO}_3$  –  $0,00034\text{-} 0,00077 \text{ г/с}$ ; оксид углерода –  $0,032\text{-} 0,048 \text{ г/с}$ ; диоксид азота –  $0,0032\text{-} 0,0047 \text{ г/с}$  (приложение Ж).

В результате проведенных испытаний установлено снижение показателей основных исследуемых параметров. Температура отходящих газов снижена на  $15\text{-}17^\circ\text{C}$ ; концентрация твердых и газообразных примесей в среднем на  $14\text{-}18\%$ . Кроме того, за счет установки трубчатого пучка произошло снижение гидравлического сопротивления в  $\sim 1,3$  раза (для аппарата с пластинчатой насадкой  $\Delta P = 2\text{-}2,5 \text{ кПа}$ ; для аппарата с трубчатой насадкой  $\Delta P = 1,5\text{-}1,95 \text{ кПа}$ ).

Двухступенчатый комбинированный газоочистной аппарат с регулярной трубчатой насадкой внедрен в технологической схеме очистки газов, отходящих от прокаточной печи в производстве окиси хрома металлургической (приложение И).

В производстве окиси хрома металлургической наиболее вредными компонентами, выбрасываемыми с отходящими газами, являются твердые частицы, содержащие хром. Нами проведены расчеты по выбросам пыли. При обследовании схемы очистки, включающей полые скруббера суммарная концентрация пылевых выбросов составила  $C_{\text{факт}} = 3,19$  г/сек. При установке инерционно-турбулентного аппарата (ИТА) суммарная концентрация пылевых выбросов была снижена и составила  $C_{\text{факт}} = 0,0858$  г/сек. При установке двухзонного комбинированного газоочистного аппарата с регулярной трубчатой насадкой суммарная концентрация пылевых выбросов составила  $C_{\text{факт}} = 0,06506$  г/сек.

Эти данные показывают, что выполнение расчета для экономической оценки ущерба инерционно-турбулентного аппарата и двухзонного комбинированного газоочистного аппарата с регулярной трубчатой насадкой не представляется возможным, так как концентрация выбрасываемой пыли в окружающую среду значительно ниже нормативного показателя (в 4,76 и 6,27 раза, соответственно) (приложение К).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### **Краткие выводы по результатам диссертационных исследований.**

1. На основе анализа конструкций и методов расчета аппаратов для проведения процессов газоочистки и теплообмена предложена классификация теплообменных и пылеулавливающих аппаратов, обоснован выбор объектов исследований - одноступенчатого двухзонного и двухступенчатых газоочистных аппаратов с регулярно размещенной насадкой, а также осуществлена постановка задач исследований.

2. Дано описание экспериментальных установок с аппаратами, использующими ударный и центробежный механизм взаимодействия потоков и методик проведения исследований гидродинамических характеристик, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи, а также эффективности пылеулавливания.

3. Для одноступенчатого двухзонного аппарата с регулярно размещенной насадкой и двухсторонним подводом газового потока получены результаты экспериментальных исследований гидродинамических закономерностей, массообменных характеристик и параметров пылеулавливания и расчетные зависимости гидравлического сопротивления зоны эжекции и вихревой зоны контакта, их общего сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя насадочной зоны, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи, эффективности пылеулавливания.

4. Для двухступенчатого аппарата ударно-вихревого действия с регулярной трубчатой насадкой получены результаты экспериментальных исследований гидродинамических закономерностей, массообменных характеристик и параметров пылеулавливания и расчетные зависимости гидравлического сопротивления ударной и вихревой ступеней контакта, их общего сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя насадочной зоны, уравнение для расчета гидравлического сопротивления при движении теплоносителя в трубах, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи, эффективности пылеулавливания.

5. Для двухступенчатого аппарата циклонно-вихревого действия с пластинчатой насадкой получены результаты экспериментальных исследований гидродинамических закономерностей, массообменных характеристик и параметров пылеулавливания и расчетные зависимости гидравлического сопротивления циклонной и вихревой ступеней контакта, их общего сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя насадочной зоны, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи, эффективности турбулентного и диффузионного осаждения твердых частиц в зоне регулярно размещенной насадки, а также математическая модель центробежного и инерционного осаждения частиц в циклонной ступени аппарата.

6. Разработаны рекомендации по эксплуатации и проектированию аппарата ударно-вихревого действия с двухсторонним подводом газового потока,



двухступенчатых аппаратов ударно-вихревого и циклонно-вихревого действия с регулярной насадкой.

7. Разработаны промышленные образцы, внедренные в технологических схемах очистки газов на АО «Актюбинский завод хромовых соединений»: двухступенчатый аппарат циклонно-вихревого действия с регулярной насадкой в схеме очистки газов, отходящих от сушилки КС в производстве сульфата хрома, где получено снижение концентрация выбросов пыли в 4,6 раза ниже нормативных показателей и двухступенчатый аппарат ударно-вихревого действия с регулярной насадкой в схеме очистки газов, отходящих от прокалочной печи в производстве окиси хрома металлургической, где снижение выбросов произошло в 6,27 раза от нормативного показателя.

**Оценка полноты решений поставленных задач.** Результаты теоретических исследований, их оценка, экспериментальное изучение гидродинамических закономерностей, массообменных и теплообменных характеристик и процесса пылеулавливания, решение вопросов математического моделирования, апробация результатов в промышленных условиях полностью соответствуют поставленным в диссертации задачам.

**Разработка рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов.** Результаты экспериментального изучения гидродинамических параметров, процессов пылеулавливания и тепломассообмена в аппаратах с регулярно размещенной насадкой и двухсторонним подводом газового потока, ударно-вихревого и циклонно-вихревого действия, математическое моделирование процесса пылеулавливания в зоне удара, действия центробежной силы и зоне вихревого взаимодействия потоков, разработанные инженерные методы расчета, рекомендации по эксплуатации и 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 расходные характеристики газового и жидкостного потоков, дисперсного состава пылевой фракции, методики инженерного расчета основных гидродинамических характеристик, параметров пылеулавливания и тепломассообмена аппаратов с регулярной подвижной насадкой, а также рекомендации по проектированию промышленных аппаратов, включающих выбор режимных и конструктивных параметров.

**Оценка технико-экономической эффективности внедрения.** По результатам проведенных исследований разработаны промышленные образцы, внедренные в технологических схемах очистки газов на АО «Актюбинский завод хромовых соединений»: двухступенчатый аппарат циклонно-вихревого действия с регулярной насадкой в схеме очистки газов, отходящих от сушилки КС в производстве сульфата хрома, где получено снижение концентрация выбросов пыли в 4,6 раза ниже нормативных показателей и двухступенчатый

аппарат ударно-вихревого действия с регулярной насадкой в схеме очистки газов, отходящих от прокаточной печи в производстве окиси хрома металлургической, где снижение выбросов произошло в 6,27 раза от нормативного показателя.

**Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области.** Проведенная технико-экономическая оценка разработанных и исследованных аппаратов с регулярно размещенной насадкой и двухсторонним подводом газового потока, ударно-вихревого и циклонно-вихревого действия показывает, что по ряду показателей, таких как энергетические показатели, материалоемкость, эффективность проведения процессов пылеулавливания и тепломассопереноса, предлагаемые аппараты превосходят современные конструкции одноступенчатых газоочистных и комбинированных аппаратов с двумя зонами контакта.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Ковалев О.С., Мухленов И.П., Туболкин А.Ф., Балабеков О.С., Молдабеков Ш., Авдякова О.С. Абсорбция и пылеулавливания в производстве минеральных удобрений. – М.: Химия, 1987. – 208 с.
- 2 Позин М.Е. Технология минеральных удобрений. – М.: Химия, 1989. – 352 с.
- 3 Авербух Т.Д., Павлов П.Г. Технология соединений хрома. Изд. 2-е, испр. – Л.: Химия, 1973 -336 с.
- 4 Технология фосфорных и комплексных удобрений /Под ред. С.Д. Эвенчика и А.А. Бродского. М.: Химия, 1987. – 464 с.
- 5 Zh. Serikuly, A.A. Volnenko, Ya. Kenig. Hydrodynamics of apparatuses with preformed packing bodies // The 7th International Conference Interdisciplinarity in Engineering (INTER-ENG 2013). Procedia Technology 12 (2014), P.375-381.
- 6 Свидетельство РФ на полезную модель №17011. Регулярная насадка для массообменных аппаратов/ М.И. Фарахов, В.В.Елизаров, Ш.Ф. Газизов и др.;заявитель и обладатель ООО «ИВЦ «Инжехим». №2000114968/20; заявл. 15.06.00; опуб. 10.03.01, Бюл. № 7. – 3 с.
- 7 Дьяконов, С.Г., Гидродинамические и массообменные характеристики рулонной насадки / С.Г.Дьяконов, В.В.Елизаров, М.И. Фарахов // Изв. вузов. Химия и химическая технология. - 2003. - Т.46. Вып. 5. - С. 143-147.
- 8 Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов /Под ред. Лаптева А.Г. – Казань: Отечество, 2013. – 454 с.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 Биргер М.И., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И. Справочник по пыли – и золоулавливанию //Под общ.ред. А.А. Русанова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312с.
- 12 Алиев Г.М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: справ.изд. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
- 13 В.Н.Ужов, А.Ю.Вальдберг, Б.И.Мягков, И.К.Решидов. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 390с.
- 14 Швыдкий В.С., Ладыгичев М.Г. Очистка газов: Справочное издание /В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.

15 Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005.- 210с.

16 Страус В. Промышленная очистка газов. Пер. с англ., под ред. Ю.Я. Косого. – М., 1981. – 392 с.

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

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

19 Volnenko A.A., Balabekov O.S. Calculation of heat-mass- exchange and dust collecting apparatus with a weighted and regular nozzle. Examples and tasks. - Shymkent: M.O. Auezov South-Kazakhstan State University, 2018. – 176p.

20 Хусанов Ж.Е. Разработка и расчет процессов комплексной очистки газов в комбинированном газожидкостном аппарате с автономными контурами орошения: дис. ... канд. техн. наук. – Шымкент, 2011. – 141с.

21 Патент на полезную модель №1431 по заявке №2015/0124.2 от 26.05.2015г. МПК В01D 47/00, В01D 46/00. Приоритет от 9.02.2016. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Балабеков О. С., Мырхалыков Ж.У., Абжапбаров А.А., Жумадуллаев Д.К., Раматуллаева Л.И. Опул.15.04.2016, бюл.№4.

22 Патент РК №35809 по заявке №2021/0372.1 от 18.06.2021г. МПК В01D 53/18(2006.01), 53/00 (2006.01), 47/02(2006.01). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Абжапбаров А.А., Корганбаев Б.Н., Хусанов Ж.Е. Жумадуллаев Д.К., Камалбек Д.К., Бажибаев Т.Р. Опул. 26.08.22, бюл. №34

23 Патент РК №33662 МПК В01D 53/20(2006.01), 47/14(2006.01). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Корганбаев Б.Н., Раматуллаева Л.И., Хусанов Ж.Е., Абжапбаров А.А., Торский А.О., Жумадуллаев Д.К.; заявитель и патентообладатель ЮКГУ им.М.Ауэзова. Опул. 7.06.19, бюл. №23.

24 Ешжанов А.А., Волненко А.А., Жумадуллаев Д.К., Абжапбаров А.А., Сарсенбекулы Д. Промышленные испытания и внедрение аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой в производстве монохромата натрия // Технические науки: проблемы и решения. Сб. ст. по материалам XXII между-нар. науч.-практ. конф. - №4(20). – М., Изд. «Интернаука», 2019. – С. 132-138

25 Volnenko A. A., Serikuly Zh., Sarsenbekuly D., Abzhapbarov A.A. Basic requirements for the design of heat and mass transfer column equipment //International Conference of Industrial Technologies and Engineering ICITE 30-31 October 2014 Shymkent, Kazakhstan – P.194-197

26 Волненко А.А., Корганбаев Б.Н., Сарсенбекулы Д., Абжапбаров А.А. Основные принципы создания энергосберегающих массообменных аппаратов // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически

безопасные технологии : Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26 – 28 ноября 2014 г. : в 2 ч. – Минск : БГТУ, 2014. – Ч. 1. – С. 269–272.

27 Abzhapbarov A.A., Volnenko A.A., Korganbaev B.N., Levanskiy A.E. Application of combined apparatus for intensification of dust collection and absorption processes // VII International Conference of «Industrial Technologist and Engineering» (ICITE 2020), Shymkent, Kazakhstan, November 12-13, 2020, V.1. – P.236-241

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

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

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

31 Сарсенбекулы Д. Методология расчета и проектирования аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры: дис. ... доктора PhD. – Шымкент. 2017. -143 с.

32 Инновационный патент №27719 Республика Казахстан,МПК В01D 53/20, В01D 47/14. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / А.А. Волненко, О.С. Балабеков, Б.Н. Крганбаев, Ж.Е. Хусанов, Н.С. Бекибаев; опубл. 18.12.13, Бюл. №12. – 4 с.

33 Патент на полезную модель №2092 МПК В01D 53/20, 47/14. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Бишимбаев В.К., Волненко А.А., Ескендилов М.З., Протопопов А.В., Жантасов К.Т., Анарбаев А.А. Опубл. 30.03.17, бюл. №6.

34 Патент на полезную модель РК №3656 по заявке №2018/0037.2 от 16.01.2018г. МПК В01D 53/20 (2006/01); В01D 47/14 (2006/1) Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Ешжанов А.А., Абжапбаров А.А., Ескендилов М.З., Жумадуллаев Д.К.

35 А.с. 1450180 СССР, МКИ В 01 D 53/20. Аппарат с регулярной насадкой /Волненко А.А., Серманизов С.С., Балабеков О.С. и др. (СССР). 1987 – не публ.

36 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.

37 Ешжанов А.А. Разработка и расчет тепломассообменного аппарата с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой: дис. ... доктора PhD. – Шымкент, 2020. -120 с.

38 Yeshzhanov A., Volnenko A., Zhumadullayev D., Abzhapbarov A., Sarsenbekuly D., Levanskiy A. Operating-design parameters analysis and hudraulic resistance calculation of vortex packed layer structure apparatus // Industrial Technology and Engineering, 2019, 1(30). – P. 48-55

39 Ешжанов А.А., Волненко А.А., Торский А.О., Жумадуллаев Д.К., Абжапбаров А.А. Режимы работы аппаратов с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой // Вестник КазНУ. – 2019. - №2 (132), 2019. – С.396 – 401

40 Инновационный патент №25540 Республика Казахстан, МПК В01D 3/00, В01D 5/00, В01D 47/05. Аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания / А.А.Волненко, В.К.Бишимбаев, М.З.Ескендеров, Ж.Е.Хусанов; опубл. 15.03.12, Бюл. № 3 – 4 с.

41 Тасев Ж., Генчев Хр. Неадиабатическая ректификация в роторно-пленочной колонне с коническими тарелками // Теор. осн. хим. технол. – 1992. – т.26. - № 4. – С.556 – 561.

42 Патент РК № 34418 на изобретение по заявке №2017/0048.1 от 20.01.2017г. МПК В01J 2/04 (2006/1); В01J 19/32 (2006/1). Приоритет установлен 22.06.2018г. №22011 Аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Балабеков О.С., Корганбаев Б.Н., Ескендеров М.З., Жумадуллаев Д.К., Ешжанов А.А., Байгутов Н.Т., Абжапбаров А.А. Бюл. №25 от 26.06.2020 г.

43 Патент на полезную модель РК №5919 по заявке №2020/1083.2 от 03.12.2020г. МПК В01D 53/20 (2006/01); В01D 47/14 (2006/1). Аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Корганбаев Б.Н., Исаева А.Н., Джакипбекова Н.О., Жумадуллаев Д.К., Абжапбаров А.А., Камалбек Д.К. Опубл. 12.03.2021, бюл. №10 –

44 Гамидов М., Сарсенбекулы Д., Серикулы Ж., Волненко А.А. Гидродинамика аппарата с регулярной трубчатой насадкой // Тр. 18-й студенческой научн. конф. по естеств., техн., соц.-гуманит. наукам: «Нұрлы жол – вклад молодых ученых в реализации программы» ЮКГУ им. М.Ауэзова.- Шымкент, 2015. – С.181-184.

45 Коузов П.А., Мыльников С.И. Сравнительная оценка и рекомендации унификации мокрых пылеуловителей // Сб. научн. трудов институтов охраны труда ВЦСПС. – М.: Профиздат, 1971. Вып. 74. С.17 – 23.

46 Коузов П.А. Пылеподатчик ЛИОТ // Сб. научн. трудов институтов охраны ВЦСПС. – М.: Профиздат, 1969. Вып. 60. - С.3 – 12.

47 Рамм В.М. Абсорбция газов. Изд. 2-е, переработ. И доп. – М.: Химия, 1976. – 656с.

48 Волненко А.А., Жубаниязов Б.Т., Аширбаев Х.А. Расчет количества удерживаемой жидкости и газосодержания в аппарате с регулярной подвижной цилиндрической насадкой // Повышение эффективности машин и аппаратов в основной химии: Тез. докл. Всес. совещ. – Сумы, 1986. С.93 – 94.

49 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.

50 Перри Джон Г. Справочник инженера-химика. – Л.: Химия, Ленингр. отд-ние, 1969. – т.1. – 639с.

51 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. – 560с.

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

53 Андреев Е.И. Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985.- 192с.

54 Русаков А.А., Янковский С.С. Импакторы для дисперсного анализа промышленных пылей. – М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1970. – 52с.

55 Янковский С.С., Булгакова Н.Г., Поляков В.А. Струйный осадитель для определения дисперсного состава фосфорсодержащих пылей /В сб. “Очистка и утилизация газовых выбросов в фосфорной промышленности”. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1975. – С.17–23.

56 Коузов П.А., Скрябина Л.Я. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. – Л.: Химия, 1983. – 138с.

57 Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – 3-е изд. перераб. – Л.: Химия, 1987. – 264с.

58 Волненко А.А., Балабеков О.С., Абжапбаров А.А., Раматуллаева Л.И. Гидродинамические закономерности в зоне эжекции при двухстороннем подводе газового потока в аппарате ударно-вихревого действия // Тр. междунард. научно-практ.конф. «Сто конкретных шагов. Современное государство для всех» - стратегический путь индустриально-инновационного развития страны» - Шымкент: ЮКГУ им.М.Ауэзова, 2015г. – С.147- 153.

59 Абжапбаров А.А., Волненко А.А., Умаров Р.Ш., Ходжимуратов Б.Ю., Бажиров Т.С. Гидродинамические закономерности в зоне эжекции и насадочной зоне при двухстороннем подводе газового потока в аппарате ударно-вихревого действия // Труды межд. науч. – практ. конф. «АУЭЗОВСКИЕ ЧТЕНИЯ–20: Наследие Мухтара Ауэзова - достояние нации» посвященная 125 - летию М.О. Ауэзова- Шымкент: ЮКУ им. М. Ауэзова, 2022. – С. 6-11

60 Abzhapbarov A.A., Volnenko A.A., Umarov R.Sh., Khodzhimuratov B. Yu., Levdansky A.E. Influence of regime parameters on hydrodynamic regularities in a shock-vortex apparatus with double-sided gas flow input //Proceeding IX International Conference «Industrial Technologies and Engineering» ICITE – 2022, Shymkent, Kazakhstan, December 9-10, 2022, V.II. – P.140-146

61 Кафаров, В.В. Основы массопередачи (системы газ-жидкость, пар-жидкость, жидкость-жидкость) : 3-е изд. перераб. и доп. / В.В. Кафаров – М.: Высшая школа, 1979. – 439с.

62 Волненко, А.А. Интенсификация процессов очистки газовых выбросов от пыли / Волненко А.А., Мустафина А.И., Жубаниязов Б.Т., Пляцук Л.Д. // Современные машины и аппараты химических производств: Сб. тез. докл. IV Всес. научн. конф. – Чимкент, 1988, Ч.2. – С.3 – 5.

63 Волненко А.А., Абжапбаров А.А., Раматуллаева Л.И., Шарафиев А.Ш. Эффективность пылеулавливания аппарата совмещающего процессы ударного и вихревого взаимодействия потоков // Тр. междунард. научно-практ.конф. «Сто

конкретных шагов. Современное государство для всех» - стратегический путь индустриально-инновационного развития страны» - Шымкент: ЮКГУ им.М.Ауэзова, 2015г. – С.154- 161.

64 Горбунов, В.А. Очистка газов фосфорных производств от пыли в комбинированных аппаратах с регулярной подвижной насадкой: Дис. ...канд. техн. наук. / Горбунов В.А.. – Шымкент, 1991. – 153 с.

65 Шарыгин, М.П. Разработка и расчет устройств для разрушения отложений и пылеулавливания с управляемым вихревым потоком: дис. ... докт. техн. наук. / Шарыгин М.П. – М.: 1992.–480с.

66 Раматуллаева Л.И., Волненко А.А., Корганбаев Б.Н. Расчет гидродинамических характеристик и параметров пылеулавливания аппарата ударно-инерционного действия с регулярной подвижной насадкой //Наука и образование Южного Казахстана. – 2007. - № 1(60).–С.91-95.

67 Горбунов, В.А. Расчет гидравлического сопротивления инерционно-турбулентного аппарата с регулярной подвижной насадкой / Горбунов В.А., Айтбаев Е., Балабеков О.С. //Современные аппараты для обработки гетерогенных сред: Межвуз. сб. научн. трудов ЛТИ им. Ленсовета. Л.: 1988. - С.135-140.

68 Емцов, Б.Т. Техническая гидромеханика. /Емцов Б.Т. – М.: Машиностроение, 1987. – 276 с.

69 Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем. / Кутателадзе С.С., Стырикович А.М. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.

70 Прандль, Л. Гидроаэромеханика. /Прандль Л. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.

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

72 Brahm, D. Absorbtion in to Turbulent Liquid / D.Brahm, C. Prosner // Chemical Engineering Science. – 1973. - V. 28, - №5. - P.12-30.

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

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

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

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

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

78 Бетчелор, Д. Введение в динамику жидкости / Д. Бетчелор.– М.: Мир, 1973. – с. 758.



79 Бекибаев, Н.С. К расчету коэффициентов тепло- и массоотдачи в контактных теплообменных аппаратах с регулярной цилиндрической насадкой/ Н.С. Бекибаев [и др.] //Вестник НАН РК. – 2003. –№3. – С.26-29.

80 Балабеков О.С., Корганбаев Б.Н., Ескендиоров М.З., Алтаев М.А. Об аналогии между изменением формы капли и интенсивностью массопереноса в обтекающем ее потоке //Вестник НАН РК. – 2002.-№6. - С.22-26.

81 Коваленко В.С. Деформация капель жидкости в газовом потоке //Теор основы хим.технол., 1978.- т.12. №2.-С.297-299.

82 Бекибаев Н.С., Раматуллаева Л.И., Волненко А.А. Моделирование инерционного осаждения твердых частиц в аппарате с ударно-вихревым взаимодействием потоков // Межд. научно-практ.конф. «Химия в строительных материалах и материаловедение в XXI веке», 2008.-С. 68-76.

83 Волненко А.А., Бажиров Т.С., Абжапбаров А.А., Раматуллаева Л.И. Методика расчета газоочистного аппарата в схеме очистки природного и попутного нефтяного газа // Междунар. науч.-практ. конф. «АУЭЗОВСКИЕ ЧТЕНИЯ - 13: «Нұрлы жол» - стратегический шаг на пути индустриально - инновационного и социально - экономического развития страны» - Шымкент: ЮКГУ им.М.Ауэзова, 2015г. – С.54- 60

84 Torsky A., Volnenko A., Plyatsyk L., Hurets L., Zhumadullaev D., Abzhapbarov A. Study of dust collection effectiveness in cyclonic-vortex action apparatus // Chemical engineering: Ecology and environmental technology - №1/3(57), 2021. – P. 21-25

85 Мустафина А.И. Гидродинамика и массообмен в аппарате с регулярной подвижной пластинчатой насадкой в широком диапазоне нагрузок по жидкости: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1989 – 180с.

86 Петин В.Ф. Разработка и моделирование массообменного аппарата с регулярной подвижной насадкой на основе импульсного взаимодействия фаз: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1982. – 241с.

87 Волненко А.А. Разработка интенсивных насадочных массообменных аппаратов с регулярным несимметричным вихреобразованием: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1986. – 261с.

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

89 Пляцук Л.Д. Гидродинамика и массообмен в прямоточном массообменном аппарате с регулярной подвижной насадкой: дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 1982. – 203с.

90 Сабырханов Д.С. Структура потоков и массообмен в аппаратах с подвижной насадкой: дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1982. – 212с.

91 Zhumadullaev D.K., Torskiy A.O., Volnenko A.A., Abzhapbarov A.A., Korganbaev B.N. Calculation of hydrodynamic characteristics of a cyclonic-vortex apparatus // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. – 2020. - V.8, №9, 2020. – P. 6091-6097.

92 Исаева А.Н., Корманбаев Б.Н., Абжапбаров А.А., Волненко А.А. Теплообменные характеристики аппарата с регулярной трубчатой насадкой // Тр. междунар. науч.-практ. конф. «Ауэзовские чтения – 19: 30 лет независимости Казахстана» - Шымкент: ЮКУ им. М.Ауэзова, 2021. – С.83-87.

93 А.А. Abzhapbarov, А.О.Torskii, А.А.Volnenko, Т.S. Bazhirov, А.Е. Levdansky. Mass transfer in a cyclone-vortex apparatus //VIII International Conference of «Industrial Technologist and Engineering» (ICITE 2021), Shymkent, Kazakhstan, November 10-11, 2021, V.II. – P.77-82

94 А. А. Volnenko, А. А. Abzhapbarov, D. K. Zhumadullayev, B. N. Korganbayev, N. T. Seitkhanov. Calculation of Hydrodynamic Parameters of the Apparatus of Shock-and-Vortex Action with a Regular Tubular Packing // International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), Vol. 16, N. 4, 2022. – P. 163-171

95 Инновационный патент №28151 РК. МПК F28F 1/42. Теплообменная труба / Волненко А.А., Голубев В.Г., Балабеков О.С., Бажиров Т.С., Хусанов Ж.Е., Жумадуллаев Д.К.; заявитель и патентообладатель ЮКГУ им.М.Ауэзова. - №2012/0374.1; заявл. 28.11.12; опубл. 17.02.14, Бюл. № 2. – 4 с.

96 Торский А.О., Волненко А.А., Абжапбаров А.А. К расчету гидродинамических характеристик насадочной зоны циклонно-вихревого аппарата // Междунар. науч.-практ. конф. «АУЭЗОВСКИЕ ЧТЕНИЯ - 16: «Четвертая промышленная революция: Новые возможности модернизации Казахстана в области науки, образования и культуры» Шымкент: ЮКГУ им.М.Ауэзова, 2018, т.9 – С.40-43.

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

98 Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. – М.:Мир, 1972. – 440с.

99 Волненко А.А., Бишимбаев В.К., Хусанов Ж.Е., Серикулы Ж. Интенсификация процесса теплообмена в аппаратах с регулярной подвижной насадкой и методология их расчета // Химический журнал Казахстана. - 2011. - №4(35) – С.132-145

100 А. А. Volnenko, А. А. Abzhapbarov, D. K. Zhumadullayev, B. N. Korganbayev, D. K. Kamalbek. Calculation of Heat and Mass Transfer Characteristics and Dust Collection Parameters of a Shock-Vortex Apparatus with a Regular Tubular Packing // International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), Vol. 16, N. 6, 2022. – P. 309-318

101 Какорин О.Я. Установка кондиционирования воздуха. Основы расчета и проектирования. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1978. - 264с.

102 Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям Под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

103 Яблонский В.С. Краткий курс технической гидромеханики. – М.: 1961. – 355 с.

- 104 Доманский И.В., Исаков В.П., Островский Г.М. и др.; / Под общ.ред. Соколова В.Н. Машины и аппараты химических производств: Примеры и задачи. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1982. – 384 с.
- 105 Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. - Энергия, 1977. – 344 с.
- 106 Боровик А.А., Протасов С.К. Процессы и аппараты химической технологии. Сборник примеров и задач: в 2ч. учебное пособие. – Минск: БГТУ, 2013. – Ч.2.- 419 с.
- 107 Петухова Б.С., Шикова В.К. Справочник по теплообменникам: в 2 т. / Пер. с англ., под ред. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – Т.1.- 560 с.
- 108 Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.:АН СССР, 1955. – 352с.
- 109 A.O. Torsky, A.A. Volnenko, A.A. Abzhabparov, A.E. Levdansky, T. M. Orynbekov. Inertial and diffusional aerosol particle deposition effectiveness In the vortex interaction zone of cyclonic-vortex action apparatus // V International Conference of «Industrial Technologist and Engineering» (ICITE 2018) dedicated to the 75TH anniversary of M.Auezov South Kazakhstan state university and 90TH anniversary of Academician S.T. Suleimenov holding within 4.0 Industrial Revolution, Shymkent, Kazakhstan, October 28, 2018, т.3. – P.190-195
- 110 Торский А.О., Волненко А.А., Абжапбаров А.А., Орынбеков Т. Расчет структурных составляющих жидкой фазы в насадочной зоне циклонно-вихревого аппарата // Тр. междунар. науч.-практ. конф. «АУЭЗОВСКИЕ ЧТЕНИЯ - 17: Новые импульсы науки и духовности в мировом пространстве» ШЫМКЕНТ: ЮКГУ им.М.Ауэзова, 2019, т.7 – С.147-152.
- 111 Torskiy A.O., Volnenko A.A., Orynbekov T., Abzhabparov A.A., Levdanskiy A.E. Methodology for calculating hydraulic resistance and dedusting efficiency of an cyclonic-vortex apparatus // Proceedings of VI International Conference «Industrial Technologist and Engineering» (ICITE 2019). – Shymkent, 2019, V.2. – P.75-80.
- 112 Torskiy A.O., Volnenko A.A., Abzhabparov A.A., Levdanskiy A.E. Hydrodynamics of a swirling flow in the cyclone-vortex apparatus // News of the academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series chemistry and technology. – 2018. - №2(428).- P.72-79.
- 113 Leith D., Mehta D. //Atmosph. Environm, 1973, V.7, №5 – P.527-549.
- 114 Leith D., Licht W. //AIChE, Symposium, Series, Air – 1971
- 115 Alexander R.- Proc. Austral. Inst. Mining Metallurgy (New Series), 1949, V.152, № 3. - P.203 – 228.
- 116 Volnenko A.A., Abzhabparov A.A., Levdanskiy A.E., Torsky A.O. Development and calculation of two-stage vortex dust collector // IV International Conference of «Industrial Technologist and Engineering» (ICITE 2017), Shymkent, Kazakhstan, October 26-27, 2017, т.2. – P.155-162.
- 117 Волненко А.А., Абжапбаров А.А., Торский А.О., Корганбаев Б.Н., Левданский А.Э. Определение времени осаждения и предельного размера осаждаемых дисперсных частиц в аппарате циклонного типа //Тр. международн. научно-практич.конф. на тему «Казахстан – на пути духовного возрождения:

развитие и будущее». Шымкент: Международный гуманитарно-технический университет, 2017. – С.11-14

118 Торский А.О. Гидродинамика и пылеулавливание в циклонно-вихревом аппарате: дис. ... доктора PhD. – Шымкент, 2020. -117 с.

119 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.

120 АО «Актюбинский завод хромовых соединений» / Постоянный технологический регламент производства сульфата хрома, цех №4, 2015. – 91с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

(19) **KZ** (13) **U** (11) **1431**  
(51) **B01D 47/00** (2006.01)  
**B01D 46/00** (2006.01)

МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

## ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21) 2015/0124.2

(22) 26.05.2015

(45) 15.04.2016, бюл. №4

(72) Волненко Александр Анатольевич; Балабеков Оразалы Сатимбекович; Мырхальков Жумахан Ушкempipyлы; Абжапбаров Абай Акилбекович; Жумадуллаев Даулет Кошкарлович; Раматуллаева Лаззат Имамадиновна

(73) Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения "Южно-Казахстанский государственный университет им. М.Ауэзова" Министерства образования и науки Республики Казахстан

(56) KZ №20069 А4 15.09.2008

(54) АППАРАТ С НАСАДКОЙ ДЛЯ ТЕПЛОМАССОБМЕНА И ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ

(57) Полезная модель относится к теплообменной и пылеулавливающей технике и может найти применение в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, пищевой, металлургической, горно-добывающей, целлюлозно-бумажной промышленности, преимущественно при осуществлении процессов теплообмена и пылеулавливания.

Задача полезной модели - повышение эффективности (массообмена, пылеулавливания) аппарата за счет организации равномерной подачи газового потока через два штуцера, расположенных друг против друга, максимальной эжекции

жидкости и равномерной подачи ее в контактную зону аппарата, а также снижение гидравлического сопротивления из-за отказа от использования конического центробежного завихрителя.

Поставленная задача решается в аппарате с насадкой для теплообмена и пылеулавливания, содержащим корпус с контактной зоной, штуцера входа и выхода газа и жидкости, рециркулирующей жидкости, опорные решетки, насадочные тела, наназанные на струны с шагом 1-4 калибра насадочного тела, в котором, согласно изобретению корпус аппарата имеет два входных газовых штуцера, расположенных с внешней стороны корпуса напротив друг друга, а в верхней части контактной зоны имеется сепарационное пространство, диаметром большим, чем контактная зона, при этом отношение диаметров входных газовых штуцеров к диаметру контактной зоны составляет 0,15-0,35, отношение диаметра сепарационного пространства к диаметру контактной зоны 1,5-2, а отношение высоты сепарационного пространства к высоте контактной зоны 0,5.

Технический результат при использовании предлагаемой полезной модели заключается в достижении высоких показателей коэффициентов теплообмена, степени пылеулавливания, снижении энергопотребления самого аппарата и упрощении конструкции узла сепарации.

(19) KZ (13) U (11) 1431

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

Известен аппарат с регулярной насадкой (А.с. СССР №1450180 кл. В01Д 53/20, 1997), включающий корпус с контактной зоной, секционированный штуцер ввода газа и штуцер, снабженный центробежным завихрителем для выхода газа, штуцеры для ввода и вывода жидкости, рециркулирующего раствора, опорные решетки и насадочные элементы, закрепленные на струнах с шагом 1-4 калибра каждого предыдущего элемента, а отношение размеров предыдущего к последующему по ходу потока газа элементу составляет 0,5-1. Работа аппарата интенсифицируется за счет ударно-вихревого взаимодействия потоков, причем вихревое взаимодействие происходит в режиме одновременного вихреобразования.

Недостатками известного аппарата является то, что штуцер, подводющий газовый поток располагается непосредственно в контактной зоне аппарата и занимает значительную ее долю. В результате, для обеспечения заданной эффективности очистки, необходимо увеличивать высоту контактной зоны. Это приводит к увеличению металлоемкости аппарата. Кроме того, при одностороннем подводе газового потока происходит неравномерная эжекция жидкости в контактную зону аппарата, что отрицательно сказывается на эффективности очистки, а применение на одной струне разных по размерам насадочных элементов приводит к усложнению конструкции насадки и стабильности поддержания синфазного режима.

Наиболее близким к предлагаемой полезной модели является аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания (Инновационный патент РК №20069, В01Д 53/20, 47/14, В01Д 43/20, 2008), включающий корпус с контактной зоной, секционированный штуцер ввода газа и штуцер, снабженный коническим центробежным завихрителем для выхода газа, штуцеры для ввода и вывода жидкости рециркулирующего раствора, опорные решетки, насадочные тела, нанизанные на струны с шагом 1-4 калибра насадочного тела и выполненные в виде конических пластинчатых элементов, имеющих угол при вершине 60-120°, а основание их разрезано на лепестки, которые повернуты относительно друг друга на 20-45°. Конические пластинчатые элементы могут располагаться на струнах основанием вниз и вверх.

Интенсификация проводимых процессов достигается за счет использования удара газового потока о поверхность жидкости, достижения режима одновременного вихреобразования

(синфазного режима) и организации вращательного движения образованных вихрей.

Недостатком известного аппарата является то, что газоподводящий штуцер, находящийся в контактной зоне непосредственно у стенки аппарата не позволяет обеспечить равномерность подачи эжектируемой жидкости в зону контакта фаз. Кроме того, штуцер является экраном для газового потока и за ним образуется застойная зона, в которой не происходит вихревого взаимодействия газа и жидкости. Для обеспечения равномерности газожидкостного слоя и снижения негативного влияния экранирующего действия входного штуцера необходимо увеличение высоты контактной зоны, что приведет к росту металлоемкости аппарата. Используемый в аппарате конический центробежный завихритель для выхода газа усложняет конструкцию аппарата и обладает значительным гидравлическим сопротивлением.

В настоящей полезной модели решается задача по разработке конструкции аппарата с насадкой для теплообмена и пылеулавливания, обеспечивающая повышение эффективности (массообмена, пылеулавливания) аппарата за счет организации равномерной подачи газового потока через два штуцера, расположенных друг напротив друга с внешней стороны корпуса, максимальной эжекции жидкости и равномерной подачи ее в контактную зону аппарата, а также снижение гидравлического сопротивления из-за отказа от использования конического центробежного завихрителя.

Технический результат при использовании предлагаемой полезной модели заключается в достижении высоких показателей коэффициентов теплообмена, степени пылеулавливания, снижении энергопотребления самого аппарата и упрощении конструкции узла сепарации.

Поставленная задача решается в аппарате с насадкой для теплообмена и пылеулавливания, содержащим корпус с контактной зоной, секционированный штуцер ввода газа и штуцер, снабженный коническим центробежным завихрителем для выхода газа, штуцеры для ввода и вывода жидкости, рециркулирующей жидкости, опорные решетки, насадочные тела, нанизанные на струны с шагом 1-4 калибра насадочного тела, в котором, согласно полезной модели корпус аппарата имеет два входных газовых штуцера, расположенных с внешней стороны корпуса напротив друг друга, а в верхней части контактной зоны имеется сепарационное пространство, диаметром большим, чем контактная зона, при этом отношение диаметров входных газовых штуцеров к диаметру контактной зоны составляет 0,15-0,35, отношение диаметра сепарационного пространства к диаметру контактной зоны 1,5-2, а отношение высоты сепарационного пространства к высоте контактной зоны 0,5.

На фиг.1 изображен общий вид аппарата с насадкой; на фиг.2 - разрез А-А корпуса аппарата.

Аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания включает корпус 1, штуцеры 2 и

3, соответственно для ввода и вывода газа, патрубков 4 для ввода свежей жидкости и патрубков 5 вывода шлама, штуцеры 6 и 7 для рециркулирующего раствора и перелива жидкости, вентили 8 для регулирования количества жидкости на перелив и циркуляцию, сепарационное пространство 9, опорно-распределительные решетки 10, струны 11 с закрепленными на них насадочными телами 12.

Сопоставительный анализ заявляемого технического решения с прототипом показывает, что заявляемое устройство отличается от известного тем, что корпус аппарата имеет два входных газовых штуцера, расположенных с внешней стороны корпуса напротив друг друга, а в верхней части контактной зоны имеется сепарационное пространство, диаметром большим, чем контактная зона. При этом отношение диаметров входных газовых штуцеров к диаметру контактной зоны составляет 0,15-0,35, отношение диаметра сепарационного пространства к диаметру контактной зоны 1,5-2, а отношение высоты сепарационного пространства к высоте контактной зоны 0,5.

Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания работает следующим образом.

Газовый поток, поступающий на очистку, подается в штуцера 2, расположенные с внешней стороны корпуса аппарата друг напротив друга. Разделенный на две части газовый поток с высокой скоростью ударяется о поверхность жидкости. Отношение диаметров входных газовых штуцеров к диаметру контактной зоны составляет 0,15-0,35, что обеспечивает достижение скорости газа в трубке свыше 10 м/с. Этой скорости достаточно для эффективного ударного взаимодействия газового потока с покоящейся жидкостью. При ударе содержащиеся в газовом потоке твердые частицы за счет сил инерции осаждаются в жидкости. В виду того, что разделенные потоки газа имеют равную силу, подхваченная ими жидкость в виде пленок и капель эжектируется в насадочную зону аппарата в центральной его части. Этим самым обеспечивается равномерная подача жидкости в контактную зону аппарата.

В насадочной зоне аппарата регулярно размещены на струнах 11 насадочные тела 12. При обтекании газожидкостным потоком насадочных тел возникает синфазный режим, характеризующийся совпадением времени образования вихрей за насадочными телами и временем движения образованных вихрей от нижнего слоя насадочных тел к следующему слою по ходу газового потока. Синфазный режим характеризуется ростом суммарной мощности вихрей, создающими высокотурбулизированный газожидкостной поток. Это способствует достижению высокой эффективности проведения процессов тепломассообмена или пылеулавливания.

Так как отношение диаметра сепарационного пространства к диаметру контактной зоны составляет 1,5-2, то пройдя контактную зону аппарата, и достигнув сепарационного пространства, газовый поток значительно теряет свою скорость. Указанный диапазон соотношений обеспечивает снижение скорости газа до 2 м/с, при которой скорость движения капель стремится к нулю и за счет сил инерции капли возвращаются в контактную зону. Увеличению эффективности сепарации способствует насадка, выполняющая роль отбойников и располагающаяся в сепарационном пространстве, высота которого составляет 0,5 высоты контактной зоны.

Очищенный газовый поток выводится из аппарата через штуцер 3.

В нижней части аппарата предусмотрена подача свежей жидкости через патрубок 4 и вывод шлама через патрубок 5. Жидкость в нижней части аппарата может находиться в режиме циркуляции при закрытом верхнем вентиле 8, а при закрытом нижнем вентиле и открытом верхнем в режиме перелива.

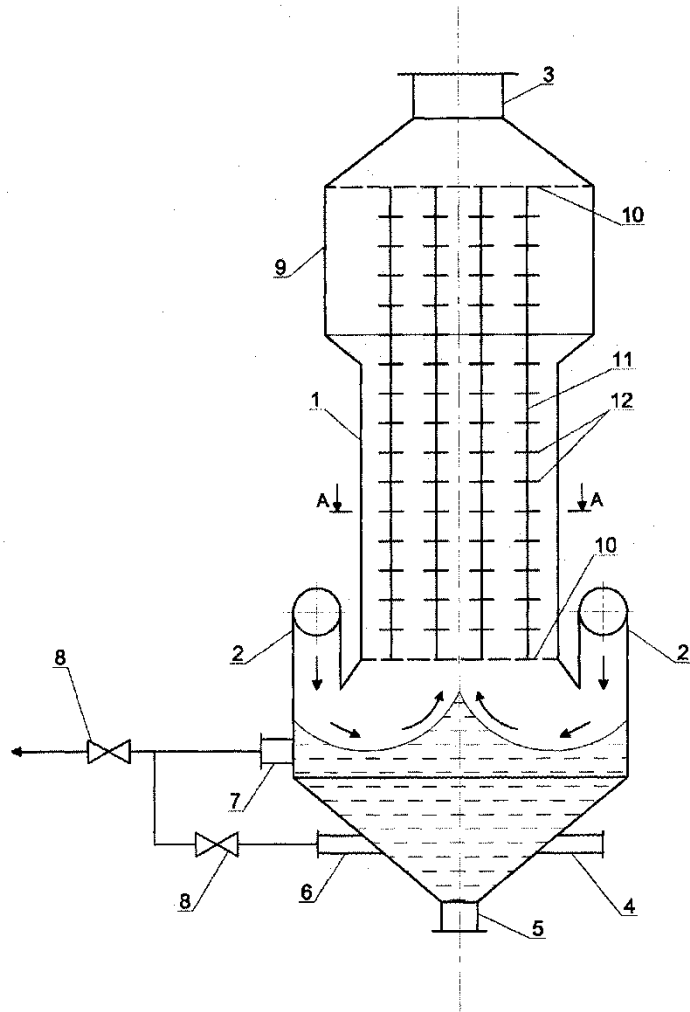
Преимуществами предложенного технического решения по сравнению с прототипом являются:

- снижение гидравлического сопротивления аппарата;
- достижение более высоких количественных показателей эффективности процессов тепломассообмена и степени пылеулавливания;
- упрощение конструкции узла сепарации.

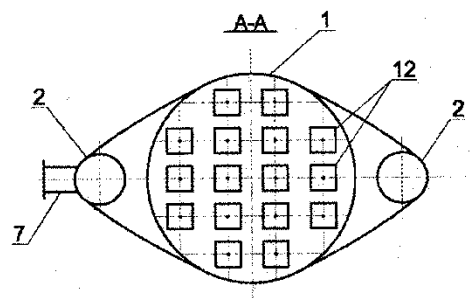
#### **ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ**

1. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания, включающий корпус с контактной зоной, секционированный штуцер ввода газа и штуцер, снабженный коническим центробежным завихрителем для выхода газа, штуцеры для ввода и вывода жидкости, рециркулирующей жидкости, опорные решетки, насадочные тела, навязанные на струны с шагом 1-4 калибра насадочного тела, **отличающийся** тем, что корпус аппарата имеет два входных газовых штуцера, расположенных с внешней стороны корпуса напротив друг друга, а в верхней части контактной зоны имеется сепарационное пространство, диаметром большим, чем контактная зона.

2. Аппарат с насадкой по п.1, **отличающийся** тем, что отношение диаметров входных газовых штуцеров к диаметру контактной зоны составляет 0,15-0,35, отношение диаметра сепарационного пространства к диаметру контактной зоны 1,5-2, а отношение высоты сепарационного пространства к высоте контактной зоны 0,5.



Фиг.1



Фиг.2

Верстка Р. Талькенов  
 Корректор К. Нгметжанова



# ПРИЛОЖЕНИЕ Б



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

(19) KZ (13) В (11) 35809  
(51) B01D 47/02 (2006.01)  
B01D 53/18 (2006.01)  
B01D 53/00 (2006.01)

МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

## ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21) 2021/0372.1

(22) 18.06.2021

(45) 26.08.2022, бюл. №34

(72) Волненко Александр Анатольевич, Абжапбаров Абай Акилбекович, Корганбаев Бауржан Ногайбаевич, Хусанов Жахонгир Евадиллоевич, Жумадуллаев Даулет Кошкарлович, Камалбек Динмухаммед Куанышбекұлы, Бажибаев Тимур Рустемович

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

(56) KZ 25540 A4, 15.03.2012

KZ 33662 B, 07.06.2019

KZ 22886 A4, 15.09.2010

(54) АППАРАТ С НАСАДКОЙ ДЛЯ ТЕПЛОМАСООБМЕНА И ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ

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

Задача изобретения – повышение эффективности пылеулавливания в нижней ступени контакта за счет вторичного использования теплоносителя из верхней ступени контакта и процесса теплообмена в насадочной зоне верхней части аппарата при применении трубчатой насадки.

Поставленная задача решается в аппарате с насадкой для теплообмена и пылеулавливания, включающем ступенчатый корпус с большим диаметром в нижней ступени контакта и меньшим диаметром в верхней ступени контакта и снабженный наклонной перегородкой с патрубками и отбойными колпаками для прохода газового потока, разграничивающей два автономных контура орошения и имеющей угол наклона 15-30°, штуцер ввода газа и штуцер для выхода газа, штуцеры для ввода и вывода жидкости, регулярную насадку из труб с шагом расположения труб в вертикальном и радиальном направлениях, причем выходные концы труб снабжены коллекторами, в котором, согласно изобретению, выходящий из нижнего коллектора трубчатого пучка теплоноситель поступает для поддержания необходимого уровня жидкости в центральную часть штуцера ввода газа в нижней ступени контакта.

В предлагаемой конструкции аппарата возможно достижение более высоких коэффициентов массотеплопередачи, констант скоростей химических реакций, снижение гидравлического сопротивления за счет использования труб, имеющих более низкий коэффициент сопротивления, возможность регулирования температуры за счет скорости движения теплоносителя по трубам, уменьшение количества жидкости за счет вторичного применения теплоносителя для поддержания необходимого уровня жидкости в нижней ступени контакта; увеличение эффективности пылеулавливания в зоне ударного взаимодействия газа и жидкости за счет постоянного присутствия свежей жидкости.

(19) KZ (13) В (11) 35809

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 аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания [Патент РК №34418, В01D 47/14, 2020), включающий корпус, штуцера входа и выхода газа и жидкости, регулярную насадку, выполненную в виде трубного пучка с шагом расположения труб в вертикальном и радиальном направлениях равном 2 диаметрам труб, концы которых снабжены коллектором для сбора и перераспределения жидкости, в котором трубчатый пучок располагается вертикально, коллекторы для сбора и перераспределения жидкости размещаются внутри корпуса аппарата и могут быть выполнены спиральными, кольцевыми, в виде кольца с решеткой из труб, иметь различные варианты подвода и перераспределения жидкости в коллекторе. Коллекторы могут равномерно располагаться по высоте трубчатого пучка.

Аппарат позволяет одновременно проводить процессы контактного теплообмена и массопереноса в режиме одновременного вихреобразования.

Недостатком известного аппарата является то, что при обработке газового потока, имеющего высокую концентрацию пыли использование только вихревого механизма, является недостаточным для очистки от пыли и получения высоких показателей эффективности.

Наиболее близким к предлагаемому изобретению является аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания [Инновационный патент РК №25540, В01D 53/20, В01D 47/14, 15.03.2012], включающий корпус с контактной зоной, штуцер ввода газа и штуцер, снабженный коническим центробежным завихрителем для выхода газа, штуцеры для ввода и вывода жидкости, рециркулирующей жидкости, опорные решетки, насадочные тела, нанизанные на струны с шагом 1-4 калибра насадочного тела, в котором, корпус аппарата выполнен ступенчатым с большим диаметром в нижней ступени контакта и меньшим диаметром в верхней ступени контакта и снабжен наклонной перегородкой с патрубками и отбойными колпаками для прохода газового потока, разграничивающей два автономных контура орошения и имеющей угол наклона 15-30°, а высота патрубков для прохода газа уменьшается в сторону, противоположную от штуцера слива отработанной орошающей жидкости. Эффективная работа аппарата достигается за счет отдельного проведения процесса пылеулавливания в нижней части аппарата и процесса тепломассообмена в насадочной зоне верхней части аппарата. При этом орошение обеих зон производится автономно и повышение концентрации улавливаемого компонента в орошаемой жидкости в нижней части

аппарата практически не влияет на эффективность процесса в верхней части.

Недостатками известного аппарата является то, что используемая насадка в виде струн с закрепленными на них насадочными телами в верхней ступени контакта не обеспечивает достаточной эффективности процесса теплообмена (нагрева или охлаждения). Кроме того, для поддержания необходимого уровня жидкости в нижней ступени контакта используется свежая поглотительная жидкость, подводимая со стороны, что приводит к удорожанию проводимых процессов.

В настоящем изобретении решается задача по разработке конструкции аппарата с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания, обеспечивающего повышение эффективности контактного теплообмена в верхней ступени контакта за счет использования трубчатой насадки в которой организовано движение теплоносителя, не смешивающегося с орошающим поглотительным раствором. При этом отработанный теплоноситель используется для поддержания необходимого уровня жидкости в нижней ступени контакта, причем его подача производится совместно с поступающим запыленным газовым потоком и в зоне ударного взаимодействия постоянно участвует свежая жидкость.

Технический результат при использовании предлагаемого изобретения заключается в достижении более высоких количественных и качественных показателей эффективности контактного теплообмена, коэффициентов массотеплопередачи и степени пылеулавливания, снижении гидравлического сопротивления насадочной зоны.

Поставленная задача решается в аппарате с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания, включающем ступенчатый корпус с большим диаметром в нижней ступени контакта и меньшим диаметром в верхней ступени контакта и снабженный наклонной перегородкой с патрубками и отбойными колпаками для прохода газового потока, разграничивающей два автономных контура орошения и имеющей угол наклона 15-30°, штуцер ввода газа и штуцер для выхода газа, штуцеры для ввода и вывода жидкости, регулярную насадку из труб с шагом расположения труб в вертикальном и радиальном направлениях, причем выходные концы труб снабжены коллекторами, в котором, согласно изобретению, выходящий из нижнего коллектора трубчатого пучка теплоноситель поступает для поддержания необходимого уровня жидкости в центральную часть штуцера ввода газа в нижней ступени контакта.

На фиг.1 изображен общий вид аппарата с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания.

На фиг.2 изображен разрез А-А корпуса аппарата в месте расположения трубчатой насадки с коллектором для сбора и перераспределения жидкости в виде кольца с решеткой из труб.

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 в верхнюю ступень контакта и штуцер 5 для ее слива, штуцер 6 для подачи теплоносителя в коллектор 7, трубы 8 для перетекания теплоносителя в пределах коллектора и трубы 9 для перелива между коллекторами, штуцер 10 для слива теплоносителя из коллектора. Верхняя и нижняя ступени контакта разделены перегородкой 11 с центральным патрубком 12 и отбойным копкаком 13. Поступление теплоносителя из верхней ступени контакта осуществляется по штуцеру 14 в центральную часть штуцера ввода газа. Вывод отработанного шлама осуществляется через патрубок 15.

Сопоставительный анализ заявляемого технического решения с прототипом показывает, что заявляемое устройство отличается от известного конструкцией насадочной зоны, представляющей собой регулярную трубчатую насадку, в трубах которой движется теплоноситель, центральным патрубком для прохода газового потока из нижней ступени контакта в верхнюю, наличием системы перетекания теплоносителя из нижнего коллектора трубчатой насадки в штуцер, соосно расположенный с выходным концом штуцера ввода газа.

Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания работает следующим образом.

Газовый поток, поступающий на очистку, подается через штуцер 2. Одновременно через штуцер 14, соосно расположенный с выходным концом штуцера ввода газа 2 подается теплоноситель из нижнего коллектора трубчатой насадки, расположенной в верхней ступени контакта. Объединенный поток газа и теплоносителя с высокой скоростью ударяется о поверхность жидкости, находящейся в нижней части аппарата. При ударе содержащиеся в газовом потоке твердые частицы за счет сил инерции осаждаются в жидкости. Введение теплоносителя через входной газовый штуцер 2 обеспечивает необходимую подпитку для поддержания заданного уровня жидкости относительно нижнего среза входного патрубка в нижней части аппарата. Кроме того, организация подачи теплоносителя в зону ударного взаимодействия способствует постоянному контакту запыленного газового потока со свежей жидкостью. Слив отработанной жидкости (шлама) из нижней ступени контакта осуществляется через патрубок 15.

Очищенный от пыли газовый поток через патрубок 12 расположенный в центральной части наклонной перегородки 11 и снабженный отбойным копкаком 13 поступает в верхнюю ступень контакта. Взаимодействие газа и жидкости, подаваемой через ороситель 4, происходит в противоточном режиме в объеме насадочной зоны, представляющей собой коллекторы 7 для сбора и перераспределения жидкости в виде кольца с решеткой из труб 8. Перетекание теплоносителя от одного коллектора к другому осуществляется через трубы 9. Такое исполнение трубчатой насадки обеспечивает максимальное использование закономерностей

взаимодействия вихрей, заключающееся в достижении режима одновременного вихреобразования (синфазного режима). Данный режим способствует значительной интенсификации проводимых процессов за счет создания высокоразвитой поверхности контакта газовой и жидкой фаз.

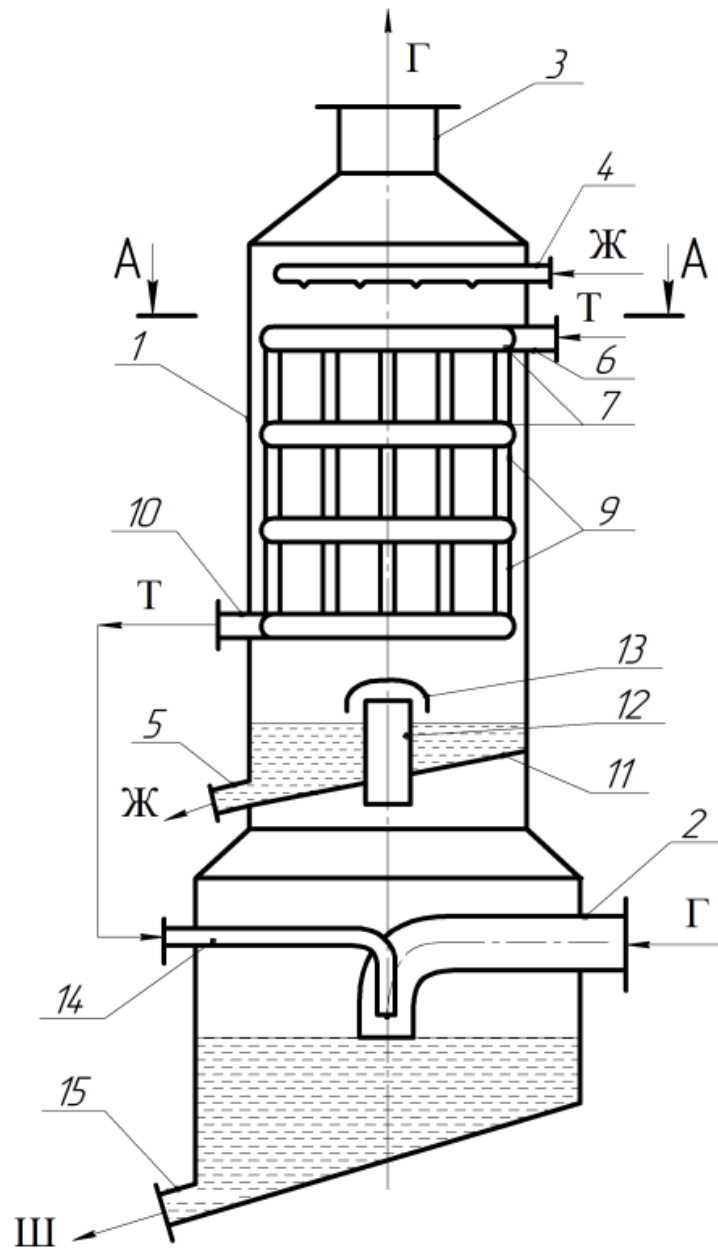
Очищенный газовый поток выводится из аппарата через штуцер 3, отработанная жидкость (абсорбент) выводится через штуцер 5, а отработанный теплоноситель из штуцера 10 поступает в нижнюю ступень контакта.

Преимуществами предложенного технического решения по сравнению с прототипом является:

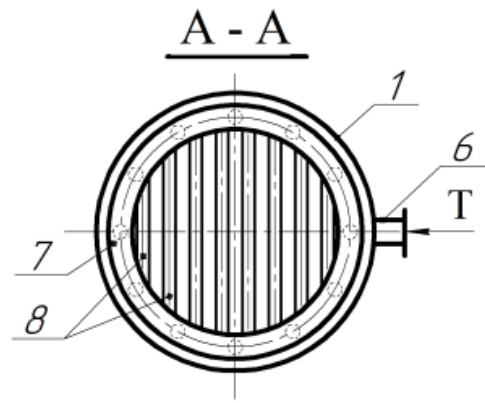
- достижение более высоких количественных и качественных показателей межфазной поверхности, коэффициентов массотеплопередачи, констант скоростей химических реакций за счет равномерного распределения газовой и жидкой фаз в объеме трубчатой насадки верхней ступени контакта;
- снижение гидравлического сопротивления насадочной зоны за счет использования труб, имеющих более низкий коэффициент сопротивления;
- возможность регулирования температуры за счет скорости движения теплоносителя по трубам в трубчатой насадке верхней ступени контакта;
- уменьшение количества поступающей жидкости за счет того, что жидкость, используемая в качестве теплоносителя в трубах в верхней ступени контакта, вторично применяется для поддержания необходимого уровня жидкости в нижней ступени контакта;
- получение более высоких показателей степени пылеулавливания в зоне ударного взаимодействия газа и жидкости за счет постоянного присутствия свежей жидкости.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания, включающий ступенчатый корпус с большим диаметром в нижней ступени контакта и меньшим диаметром в верхней ступени контакта и снабженный наклонной перегородкой с патрубками и отбойными копкаками для прохода газового потока, разграничивающей два автономных контура орошения и имеющей угол наклона 15-30°, штуцер ввода газа и штуцер для выхода газа, штуцеры для ввода и вывода жидкости, регулярную насадку из труб с шагом расположения труб в вертикальном и радиальном направлениях, причем выходные концы труб снабжены коллекторами, отличающийся тем, что выходящий из нижнего коллектора трубчатого пучка теплоноситель поступает для поддержания необходимого уровня жидкости в центральную часть штуцера ввода газа в нижней ступени контакта.



Фиг. 1



ФИГ. 2

Верстка Д. Женьсина  
Корректор Б. Омарова

## ПРИЛОЖЕНИЕ В



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

(19) KZ (13) B (11) 33662  
(51) B01D 53/20 (2006.01)  
B01D 47/14 (2006.01)

МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

### ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

#### К ПАТЕНТУ

(21) 2017/0912.1

(22) 16.10.2017

(45) 07.06.2019, бюл. № 23

(72) Волненко Александр Анатольевич; Корганбаев Бауржан Ногайбаевич; Раматуллаева Лаззат Имамадиновна; Хусанов Жахонгир Евадиллоевич; Абжапбаров Абай Акилбекович; Торский Андрей Олегович; Жумадуллаев Даулет Кошкарлович

(73) Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения "Южно-Казахстанский государственный университет имени М.Ауэзова" Министерства образования и науки Республики Казахстан

(56) KZ 25540 A4, 15.03.2012

CN 107243206 A, 13.10.2017

SU 1500334 A1, 15.08.1989

KZ 20069 A4, 15.09.2008.

(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 раздельного проведения процесса пылеулавливания сухим способом в нижней части аппарата и процесса теплообмена в насадочной зоне верхней части аппарата.

Поставленная задача решается в аппарате с насадкой для теплообмена и пылеулавливания, включающем корпус с контактными зонами,

разграниченными наклонной перегородкой с углом наклона 15-30° с патрубками и отбойными колпаками для прохода газового потока, штуцер ввода газа и штуцер, снабженный коническим центробежным завихрителем для выхода газа, штуцеры для ввода и вывода жидкости, рециркулирующей жидкости, опорные решетки, насадочные тела, наназанные на струны с шагом 1-4 калибра насадочного тела, в котором, согласно изобретению, корпус аппарата имеет одинаковый диаметр в нижней и верхней ступенях контакта, штуцер для ввода газа в нижней ступени выполнен тангенциально с углом наклона 11-25°, выход газового потока в верхнюю ступень контакта осуществляется через центральную трубу, установленную соосно с корпусом нижней ступени контакта, при этом диаметр центральной трубы в нижней ступени контакта 0,59D (D - внутренний диаметр аппарата), диаметр патрубка для вывода пыли (0,3-0,4)D, длина центральной трубы до наклонной перегородки составляет (1,2-2,0)D, а длина центральной трубы над наклонной перегородкой (0,5-0,6)D, высота цилиндрической и конической частей нижней ступени (2,0-2,26)D.

Выполнение нижней ступени аппарата с тангенциальным подводом газового потока и центральной трубой, расположенной соосно с корпусом для вывода газа позволяет реализовать сухой способ пылеулавливания, исключающим образование шлама. Изготовление корпуса аппарата с одинаковым диаметром в верхней и нижней ступенях контакта приводит к снижению материалоемкости аппарата и уменьшению производственной площади, занятой под газоочистное оборудование.

(19) KZ (13) B (11) 33662

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 регулярной насадкой (а.с. СССР №1450180 кл. В01Д 53/20, 1997), включающий корпус с контактной зоной, секционированный штуцер ввода газа и штуцер, снабженный центробежным завихрителем для выхода газа, штуцеры для ввода и вывода жидкости, рециркулирующего раствора, опорные решетки и насадочные элементы, закрепленные на струнах с шагом 1-4 калибра каждого предыдущего элемента, а отношение размеров предыдущего к последующему по ходу потока газа элементу составляет 0,5-1.

Эффективность работы аппарата достигается за счет использования механизмов ударного и вихревого взаимодействия потоков, причем вихревое взаимодействие происходит в режиме одновременного вихреобразования (синфазного режима).

Недостатком известного аппарата является то, что использование на струнах насадочных элементов с увеличивающимся по ходу газового потока размерами приводит к усложнению конструкции насадки и стабильности поддержания синфазного режима. Кроме того, при проведении процессов абсорбции и пылеулавливания с большой концентрацией адгезионных твердых частиц в одной ступени контакта происходит быстрое насыщение поглотительного раствора, в результате чего эффективность аппарата резко снижается.

Наиболее близким к предлагаемому изобретению является аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания (инновационный патент РК №25540, В01Д 53/20, 47/14, 2012), включающем корпус с контактной зоной, секционированный штуцер ввода газа и штуцер, снабженный коническим центробежным завихрителем для выхода газа, штуцеры для ввода и вывода жидкости, рециркулирующей жидкости, опорные решетки, насадочные тела, нанизанные на струны с шагом 1-4 калибра насадочного тела, в котором, корпус аппарата выполнен ступенчатым с большим диаметром в нижней ступени контакта и меньшим диаметром в верхней ступени контакта и снабжен наклонной перегородкой с патрубками и отбойными колпаками для прохода газового потока, разграничивающей два автономных контура орошения и имеющей угол наклона 15-30°, а высота патрубков для прохода газа уменьшается в сторону, противоположную от штуцера слива отработанной орошающей жидкости.

Эффективность работы аппарата достигается за счет использования ударного механизма взаимодействия газового потока с жидкостью в нижней ступени контакта и вихревого

взаимодействия фаз (с возможностью достижения синфазного режима) в верхней ступени контакта.

Недостатками известного аппарата является то, что изготовление двух ступеней контакта с разными диаметрами приводит к увеличению материалоемкости аппарата. Кроме того, в двух ступенях контакта используется поглотительный раствор (одинаковый или разный по составу), что неизбежно приводит к увеличению количества шлама, требующего дальнейшей переработки, а значит и росту стоимости проведения процессов.

В настоящем изобретении решается задача по разработке конструкции аппарата с насадкой для теплообмена и пылеулавливания, обеспечивающей повышение эффективности аппарата за счет раздельного проведения процесса пылеулавливания в нижней части аппарата и процесса теплообмена в насадочной зоне верхней части аппарата. При этом процесс пылеулавливания в нижней части аппарата осуществляется сухим способом, а абсорбция или контактный теплообмен проводится в верхней части аппарата с использованием поглотительного раствора.

Технический результат при использовании предлагаемого изобретения заключается в достижении высокой эффективности процесса пылеулавливания в отсутствие поглотительного раствора, обеспечении высоких показателей коэффициентов массоотдачи и теплоотдачи, снижении материалоемкости аппарата, уменьшении производственной площади за счет создания более компактного аппарата.

Поставленная задача решается в аппарате с насадкой для теплообмена и пылеулавливания, включающем ступенчатый корпус с контактными зонами, разграниченными наклонной перегородкой с углом наклона 15-30° с патрубками и отбойными колпаками для прохода газового потока, штуцер ввода газа и штуцер, снабженный коническим центробежным завихрителем для выхода газа, штуцеры для ввода и вывода жидкости, рециркулирующей жидкости, опорные решетки, насадочные тела, нанизанные на струны с шагом 1-4 калибра насадочного тела, в котором, согласно изобретению, корпус аппарата имеет одинаковый диаметр в нижней и верхней ступенях контакта, штуцер для ввода газа в нижней ступени выполнен тангенциально с углом наклона 11-25°, выход газового потока в верхнюю ступень контакта осуществляется через центральную трубу, установленную соосно с корпусом нижней ступени контакта, при этом диаметр центральной трубы в нижней ступени контакта 0,59D (D - внутренний диаметр аппарата), диаметр патрубка для вывода пыли (0,3-0,4)D, длина центральной трубы до наклонной перегородки составляет (1,2-2,0)D, а длина центральной трубы над наклонной перегородкой (0,5-0,6)D, высота цилиндрической и конической частей нижней ступени (2,0-2,26) D.

На фиг. 1 изображен общий вид аппарата с двумя ступенями контакта; на фиг. 2 - разрез А-А корпуса аппарата.

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 в верхнюю ступень контакта и штуцер 5 для слива отработанного поглотителя, штуцеры 6 и 7 для рециркулирующей жидкости, опорно-распределительные решетки 8, струны 9 с закрепленными на них насадочными телами 10. Штуцер вывода газа 3 снабжен коническим центробежным завихрителем 11. Верхняя и нижняя ступень контакта разделены наклонной перегородкой 12 с вмонтированной в нее центральной трубой 13, расположенной соосно с корпусом нижней ступени контакта. Верхний срез центральной трубы снабжен колпаком 14. Нижняя ступень контакта имеет коническое днище 15 с патрубком для вывода уловленной пыли 16.

Сопоставительный анализ заявляемого технического решения с прототипом показывает, что заявляемое устройство отличается от известного тем, что корпус аппарата имеет одинаковый диаметр в нижней и верхней ступенях контакта, штуцер для ввода газа в нижней ступени имеет тангенциальный вход с углом наклона  $11-25^\circ$ , а выход газового потока в верхнюю ступень контакта осуществляется через центральную трубу, установленную соосно с корпусом нижней ступени контакта.

Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания работает следующим образом.

Газовый поток, поступающий на очистку, подается через штуцер 2 установленный тангенциально в нижней части аппарата. При тангенциальном подводе газового потока возникает центробежная сила, которая воздействует на твердые частицы пыли, прижимая их к внутренней стенке аппарата 1. Под действием силы тяжести твердые частицы пыли сползают в коническое днище 15 нижней ступени контакта и выводятся из аппарата через патрубок 16.

Очищенный от пыли газовый поток через нижний срез центральной трубы 13 поступает в верхнюю ступень контакта. При входе в нее центральная труба 13 снабжена колпаком 14 для исключения попадания стекающей орошающей жидкости.

Нижняя и верхняя ступени контакта разделены наклонной перегородкой 12, вследствие чего работа их происходит автономно.

Работа верхней ступени контакта происходит в противоточном режиме. В этом случае, поступающий снизу газовый поток, взаимодействует с орошающей жидкостью, подаваемой через оросителя 4 в объеме насадочной зоны. Расположение насадочных элементов 10 на струнах 9 выполнено с шагом  $1-4$  калибра насадочного тела (в зависимости от их геометрической формы). Эти шаги обеспечивают достижение режима одновременного вихреобразования (синфазного режима). Режим одновременного вихреобразования характеризуется совпадением времени образования вихрей за насадочными телами и временем движения

образованных вихрей за цепочкой насадочных тел, расположенных по ходу движения газового потока. В момент подлета происходит взаимодействие подлетевших и завершивших цикл формирования вихрей за насадочными телами. В результате такого взаимодействия суммарная мощность вихрей увеличивается, что позволяет совершить большую работу по дроблению орошающей жидкости и созданию высокоразвитой межфазной поверхности.

Очищенный газовый поток выводится из аппарата через штуцер 3, снабженный коническим центробежным завихрителем 11 со штуцерами слива отсепарированной жидкости 6. Отсепарированная жидкость возвращается в аппарат через штуцер 7 и вместе с отработанной жидкостью в верхней ступени через патрубок 5 выводится из аппарата.

Выполнение корпуса аппарата с одинаковым диаметром в нижней и верхней ступенях контакта является возможным, вследствие того, что оптимальной скоростью газового потока при реализации центробежного механизма пылеулавливания и вихревого взаимодействия потоков при проведении процессов тепломассообмена является скорость  $3,5-4,5$  м/с. Это обеспечивает компактность аппарата и снижение его материалоемкости.

Установка штуцера для ввода газа в нижней ступени контакта с углом наклона  $11-25^\circ$  позволяет регулировать эффективность пылеулавливания и гидравлического сопротивления нижней ступени контакта. При работе в нижнем пределе угла наклона входного патрубка снижается гидравлическое сопротивление и вместе с этим падает эффективность пылеулавливания. Работа при верхнем пределе угла наклона входного патрубка, наоборот, приводит к росту эффективности пылеулавливания, тогда как гидравлическое сопротивление увеличивается.

В том случае, когда выдерживаются следующие конструктивные соотношения в нижней ступени контакта: диаметр центральной трубы  $0,59D$  ( $D$  - внутренний диаметр аппарата), диаметр патрубка для вывода пыли  $(0,3-0,4)D$ , длина центральной трубы до наклонной перегородки составляет  $(1,2-2,0)D$ , а длина центральной трубы над наклонной перегородкой  $(0,5-0,6)D$ , высота цилиндрической и конической частей нижней ступени  $(2,0-2,26)D$ , обеспечивается оптимальное сочетание эффективности пылеулавливания и гидравлического сопротивления.

Установка центральной трубы с длиной менее  $1,2D$  до наклонной перегородки позволяет несколько снизить гидравлическое сопротивление нижней ступени, но эффективность пылеулавливания при этом падает. Увеличение длины трубы свыше  $2D$  приводит к росту гидравлического сопротивления при практически неизменной эффективности.

Длина центральной трубы над наклонной перегородкой  $(0,5-0,6)D$  обеспечивает стабильную работу верхней ступени аппарата и исключает попадание орошающей жидкости в нижнюю ступень контакта.



Высота цилиндрической и конической частей нижней ступени должна составлять  $(2,0-2,26)D$ . Снижение высоты как цилиндрической, так и конической частей менее  $2D$  приводит к ухудшению показателей эффективности, а превышение высоты свыше  $2,26D$  способствует росту габаритов и материалоемкости аппарата.

Преимуществами предложенного технического решения по сравнению с прототипом является:

- обеспечение эффективного проведения процесса пылеулавливания сухим способом, исключая образование шлама;
- снижение материалоемкости аппарата за счет изготовления корпуса аппарата с одинаковым диаметром в верхней и нижней ступенях контакта;
- уменьшение производственной площади, занятой под газоочистное оборудование.

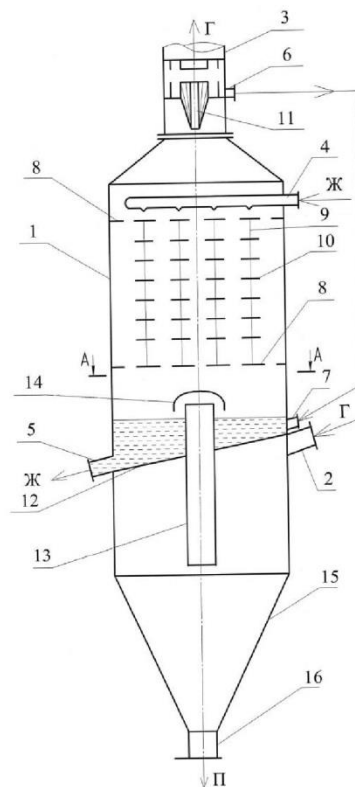
#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания, включающий ступенчатый корпус с контактными зонами, разграниченными наклонной перегородкой с углом наклона  $15-30^\circ$  с патрубками и отбойными колпаками для прохода

газового потока, штуцер ввода газа и штуцер, снабженный коническим центробежным завихрителем для выхода газа, штуцеры для ввода и вывода жидкости, рециркулирующей жидкости, опорные решетки, насадочные тела, нанизанные на струны с шагом 1-4 калибра насадочного тела, **отличающийся** тем, что корпус аппарата имеет одинаковый диаметр в нижней и верхней ступенях контакта, штуцер для ввода газа в нижней ступени выполнен тангенциально, а выход газового потока в верхнюю ступень контакта осуществляется через центральную трубу, установленную соосно с корпусом нижней ступени контакта.

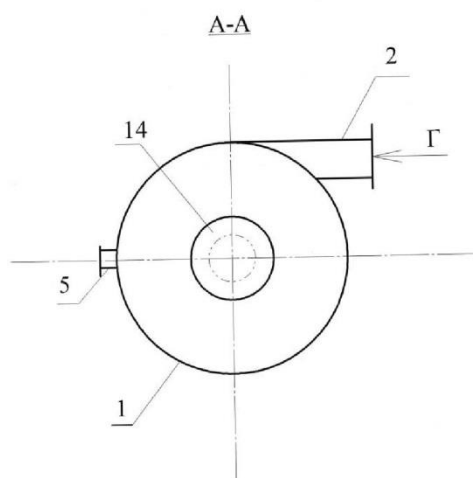
2. Аппарат с насадкой по п.1, **отличающийся** тем, что штуцер для ввода газа в нижней ступени контакта имеет угол наклона  $11-25^\circ$ .

3. Аппарат с насадкой по п.1, **отличающийся** тем, что диаметр центральной трубы в нижней ступени контакта  $0,59 D$ , диаметр патрубка для вывода пыли  $(0,3-0,4) D$ , длина центральной трубы до наклонной перегородки составляет  $(1,2-2,0) D$ , а длина центральной трубы над наклонной перегородкой  $(0,5-0,6) D$ , высота цилиндрической и конической частей нижней ступени  $(2,0-2,26) D$ .



Фиг. 1

33662



Фиг. 2

Верстка Ж. Каримбекова  
Корректор Б. Омарова

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г



«АКТИВЕРЖДАЮ»  
Председатель правления  
АО «АЗХС»

Химич А.А.  
2018г.

### А К Т

промышленных испытаний циклонно-вихревого аппарата в схеме сушки сульфата хрома в производстве сульфата хрома (производство сульфата хрома(основного), цех №4).

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  $\text{CrO}_3$  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», высушенный сульфат хрома поступает на расфасовку.

Технологический процесс производства сульфата хрома содержит следующие стадии:

- 1 прием серы технической в цех, подача серы в печь, сжигание ее, с образованием сернистого газа, охлаждение сернистого газа;
- 2 прием бихроматного раствора из цеха №3, разбавление его и подача на ПГУУ, очистки отработанных газов схемы восстановления;
- 3 восстановление бихроматного раствора сернистым газом, получение раствора основного сульфата хрома;
- 4 корректировка раствора сульфата хрома бихроматом натрия, сахаром или бисульфитом натрия (при необходимости);
- 5 сушка;
- 6 упаковка продукта, складирование и отгрузка потребителю;
- 7 приготовление раствора бисульфита натрия;
- 8 обеспечение котла-утилизатора питающей водой, подогрев и подача воздуха в печь окисления серы;
- 9 переработка несоответствующей продукции.

Работы по внедрению циклонно-вихревого аппарата проведены на 5-й стадии в схеме очистки отходящих газов от сушилки «КС».

Из бака-питателя сиропообразный раствор сульфата хрома с концентрацией по  $\text{CrO}_3$  (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  $(145-155)^{\circ}\text{C}$ . Температура в слое  $(7075)^{\circ}\text{C}$ . 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, затем выбрасывается через санитарную трубу в атмосферу. На орошение скруббера используется техническая вода. По достижении концентрации  $(110-120)\text{г/л}$  по  $\text{CrO}_3$  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.

Во время обследования существующей технологической схемы очистки, в которой в качестве окончательной ступени был установлен орошаемый польей скруббер, максимальное снижение концентрации пыли (среднее значение) составило  $S_k=0,22\text{г/нм}^3$ , что выше нормативного показателя ( $S_{\text{норм.}}=0,174\text{ г/нм}^3$ ).

В реконструируемой схеме очистки орошаемый скруббер заменен на циклонно-вихревой аппарат.

Циклонно-вихревой аппарат работает следующим образом.

Газовый поток, поступающий на очистку, подается через штуцер установленный тангенциально в нижней части аппарата. При тангенциальном подводе газового потока возникает центробежная сила, которая воздействует на твердые частицы пыли, прижимая их к внутренней стенке аппарата. Под действием силы тяжести твердые частицы пыли сползают в коническое днище нижней ступени контакта и выводятся из аппарата через нижний патрубок.

Очищенный от пыли газовый поток через нижний срез центральной трубы поступает в верхнюю ступень контакта. При входе в нее центральная труба снабжена колпаком для исключения попадания стекающей орошающей жидкости.

Нижняя и верхняя ступени контакта разделены наклонной перегородкой, вследствие чего работа их происходит автономно.

Работа верхней ступени контакта происходит в противоточном режиме. В этом случае, поступающий снизу газовый поток, взаимодействует с орошающей жидкостью, подаваемой через ороситель в объеме насадочной зоны. Расположение насадочных элементов на струнах выполнено с шагом 2 калибра насадочного тела (для пластин). Этот шаг обеспечивает достижение режима одновременного вихреобразования (синфазного режима). Режим

одновременного вихреобразования характеризуется совпадением времени образования вихрей за насадочными телами и временем движения образованных вихрей за цепочкой насадочных тел, расположенных по ходу движения газового потока. В момент подлета происходит взаимодействие подлетевших и завершивших цикл формирования вихрей за насадочными телами. В результате такого взаимодействия суммарная мощность вихрей увеличивается, что позволяет совершить большую работу по дроблению орошающей жидкости и созданию высокоразвитой межфазной поверхности.

Очищенный газовый поток выводится из аппарата через выходной патрубок. Отработанная жидкость в верхней ступени через патрубок выводится из аппарата.

Во время испытаний реконструированной технологической схемы, проводимых совместно сотрудниками ЮКГУ им. М.Ауэзова и АО «АЗХС», получены данные, представленные в таблице 1.

Замеры основных параметров газового потока при прохождении газоочистного оборудования показали, что:

До группы циклонов

- температура газа 61-65<sup>0</sup>С;
- давление (350-460) Па;
- расход газа 6780-7760 нм<sup>3</sup>/ч;
- средняя концентрация пыли 8,0 г/нм<sup>3</sup>.

После группы циклонов

- температура газа 58-63<sup>0</sup>С;
- давление (480-510) Па;
- расход газа 8100-8770 нм<sup>3</sup>/ч;
- средняя концентрация пыли 2,405 г/нм<sup>3</sup>.

После циклонно-вихревого аппарата

- температура газа 43-52<sup>0</sup>С;
- давление (160-200) Па;
- расход газа 10630-11770 нм<sup>3</sup>/ч;
- средняя концентрация пыли 0,029 г/нм<sup>3</sup>.

В результате проведенных испытаний подтверждена возможность эффективного улавливания пыли из газовых выбросов в циклонно-вихревом аппарате (ниже требований норматива).

Акт подписали:

От АО «АЗХС»

Начальник Производственного  
отдела

Осыка А.В..

Начальник УТР

Бульбин С.В.

Начальник ПЭО

Чуянова А.В.

от ЮКГУ им. М.Ауэзова

Научный руководитель

д.т.н., проф. А.А.Волненко

Исполнители:

А.О. Торский

А.А. Абжапбаров

Таблица 1 - Результаты промышленных испытаний циклонно-вихревого аппарата в производстве сульфата хрома (производство сульфата хрома (основного), цех №4).

№ п/п	Диаметр газохода, мм	Температура, °С	Давление, Па	Скорость в газоходе, м/с	Производительность, нм <sup>3</sup> /ч	Концентр. пыли, г/нм <sup>3</sup>
Вход до циклонов						
1.	700	63	430	6,9	7760	8,200
2.		65	400	6,7	7500	6,992
3.		64	350	6,4	7260	8,816
4.		61	460	6,1	6780	8,019
Выход после циклонов						
1.	800	60	510	6,8	8770	2,46
2.		63	505	6,7	8560	2,10
3.		62	480	7,0	8340	2,65
4.		58	490	6,5	8100	2,41
Выход после циклонно-вихревого аппарата						
1.	800	50	200	7,2	11000	0,040
2.		48	180	7,0	10770	0,018
3.		43	160	6,8	10630	0,027
4.		52	200	7,4	11240	0,030

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

«УТВЕРЖДАЮ»  
Председатель правления  
АО «АЗХС»  
Химич А.А.  
«26» 2018г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ циклонно-вихревого аппарата

ЗАКАЗЧИК – АО «Актюбинский завод хромовых соединений»

НАСТОЯЩИМ АКТОМ ПОДТВЕРЖДАЕТСЯ, что результаты работы «Разработка и внедрение низкоэнергоемких и высокоэффективных тепло-массообменных и газоочистных аппаратов для процессов теплообмена и газоочистки».

ВЫПОЛНЕННОЙ В Южно-Казахстанском государственном университете им. М.Ауэзова.

ВЫПОЛНЯЕМОЙ в период с 01.06.18 г. по 31.12.18 г.

ВНЕДРЕНЬ на АО «Актюбинский завод хромовых соединений».

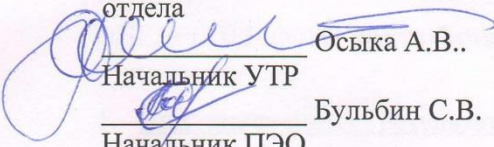
1. Вид внедренных результатов: циклонно-вихревой аппарат для проведения процесса пылеулавливания.
2. Характеристика масштаба внедрения: единичное.
3. Форма внедрения: конструкция циклонно-вихревого аппарата.
4. Новизна результатов научно-исследовательских работ: комбинирование центробежного (в нижней ступени аппарата) и инерционно-диффузионного (в верхней ступени аппарата в объеме регулярной подвижной насадки)


механизмов позволило значительно повысить эффективность процесса пылеулавливания.

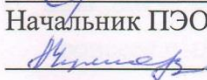
5. Опытно-промышленная проверка: промышленные испытания циклонно-вихревого аппарата, установленного в схеме в схеме сушки сульфата хрома в производстве сульфата хрома.
6. Внедрен: циклонно-вихревой аппарат в производство сульфата хрома (цех № 4) и сдан в эксплуатацию с 24.12.2018 г.
7. Социальный и научно-технический эффект: снижение воздействия на окружающую среду вредных выбросов, улучшение и оздоровление условий труда.

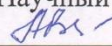
Акт подписали:


От АО «АЗХС»  
Начальник Производственного  
отдела

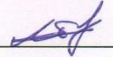
 Осыка А.В..

Начальник УТР  
 Бульбин С.В.

Начальник ПЭО  
 Чуянова А.В.

от ЮКГУ им. М.Ауэзова  
Научный руководитель  
 д.т.н., проф. А.А.Волненко

Исполнители:  
 А.О. Торский

 А.А.Абжапбаров



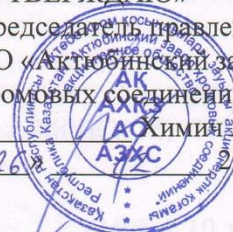
## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

«УТВЕРЖДАЮ»

Председатель управления  
АО «Актюбинский завод  
хромовых соединений».

А.А. Химич

«26» 12 2018г.



### РАСЧЕТ

эффективности природоохранных мероприятий по защите атмосферы от загрязнений в производстве сульфата хрома (акт внедрения от 24.12.2018года).

Установление экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды осуществляется на основании «Правил экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды» [1].

Экономическая оценка ущерба косвенным методом от загрязнения атмосферного воздуха выбросами от стационарных источников и от сжигания газа на факелах, сверхустановленных нормативов по *i*-ому ингредиенту определяется по формуле:

$$U_i = (C_{\text{факт}i} - C_{\text{норм}i}) \times 3\,600/1\,000\,000 \times A_i \times T \times 2,2 \text{ МРП} \times 10 \times K_1 \times K_2 \quad (1)$$

где:  $U_i$  – экономическая оценка ущерба от загрязнения атмосферного воздуха от стационарных источников и от сжигания газа на факелах, *i*-ым ингредиентом, тенге;

$C_{\text{факт}i}$  – фактический выброс *i*-ого загрязняющего вещества, выявленный в ходе государственного либо производственного экологического контроля, г/сек;

$C_{\text{норм}i}$  – норматив выброса *i*-ого загрязняющего вещества, г/сек;

$A_i$  – коэффициент относительной опасности, определяемый по формуле:

$A_i = 1/\text{ПДК}_{\text{ср}}$ , где  $\text{ПДК}_{\text{ср}}$  – предельно допустимая среднесуточная концентрация загрязняющего вещества в атмосферном воздухе;

$T$  – время работы оборудования за период нанесения ущерба, принимаемое за время, прошедшее с последней проверки, проведенной в ходе государственного либо производственного экологического контроля (в часах);

МРП – месячный расчетный показатель, установленный законодательными актами на соответствующий финансовый год;

10 – повышающий коэффициент;

$K_1$  – коэффициент экологической опасности (определяется по приложению 1 [1]);

$K_2$  – коэффициент экологического риска (определяется по приложению 2 [1]).

Для существующей технологической схемы, исходя из показателей концентрации пыли после группы циклонов, экономическая оценка ущерба по уравнению (1) при следующих значениях составляющих:

$C_{\text{факт}} = 5,64 \text{ г/сек}$ ;  $C_{\text{норм}} = 0,408 \text{ г/сек}$ ;  $A = 1/\text{ПДК}_{\text{сс}} = 66,7$  где  $\text{ПДК}_{\text{сс}} = 0,015 \text{ мг/м}^3$  для пыли в пересчете на Cr(VI);  $T = 7200 \text{ час}$ ;  $\text{МРП}(2018) = 2405 \text{ тенге}$ ;  $K_1 = 1$ ;  $K_2 = 1$  составит:

$$U_1 = (5,64 - 0,408) \times 3 \ 600 / 1 \ 000 \ 000 \times 66,7 \times 7200 \times 2,2 \times 2405 \times 10 \times 1 \times 1 = 478592984,3 \text{ тенге}$$

Для технологической схемы с орошаемым полым скруббером ( $C_{\text{факт}} = 0,667 \text{ г/сек}$ ;  $C_{\text{норм}} = 0,408 \text{ г/сек}$ ) экономическая оценка ущерба составит:

$$U_2 = (0,667 - 0,408) \times 3 \ 600 / 1 \ 000 \ 000 \times 66,7 \times 7200 \times 2,2 \times 2405 \times 10 \times 1 \times 1 = 23691816,3 \text{ тенге}$$

Орошаемый полый скруббер позволяет снизить величину ущерба, однако нормативных требований при этом достигнуто не было.

После установки циклонно-вихревого аппарата в схеме сушки сульфата хрома в производстве сульфата хрома натрия вместо орошаемого полого скруббера произошло снижение концентрации выбрасываемой пыли в окружающую среду  $C_{\text{факт}} = 0,029 \text{ г/м}^3$  или  $0,088 \text{ г/сек}$  (акт промышленных испытаний), что значительно ниже нормативного показателя.

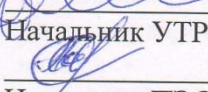
### Литература

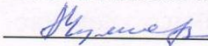
1 Об утверждении Правил экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды /Постановление Правительства Республики Казахстан от 27 июня 2007 года N 535

От АО «АЗХС»

Начальник Производственного  
отдела

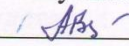
 Осыка А.В..

Начальник УТР  
 Бульбин С.В.

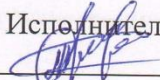
Начальник ПЭО  
 Чуянова А.В.

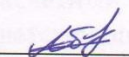
от ЮКГУ им. М.Ауэзова

Научный руководитель

 д.т.н., проф. А.А.Волненко

Исполнители:

 А.О. Горский

 А.А.Абжапбаров

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

«УТВЕРЖДАЮ»

Председатель правления  
АО «АЗХС»

Химич А.А.  
2021г.



### А К Т

промышленных испытаний двухзонного комбинированного газоочистного аппарата с регулярной трубчатой насадкой в схеме очистки газов, отходящих от прокалочной печи №1 в производстве окиси хрома металлургической (цех №4).

Метод производства окиси хрома металлургической основан на реакции образования гидратированной окиси хрома (ГОХ) из монохромата натрия и серы в растворе при нагреве до (140 - 150 °С) и давлении 0,4- 0,6 МПа в автоклаве. Реакция идет в щелочной среде и с избытком серы против расчетно необходимого количества. При этом часть щелочи поглощается осадком гидроокиси хрома, а избыток введенной в процесс серы растворяется с образованием серосодержащих соединений- полисульфидов и тиосульфата натрия. При обработке указанной смеси дополнительным количеством монохромата натрия, полисульфиды окисляются с образованием гидроокиси хрома и тиосульфата натрия. Для того, чтобы превратить гидроокись хрома в окись хрома, ее подвергают высокотемпературному нагреву в прокалочной печи. Одновременно в печи идет реакция образования монохромата натрия и окисление тиосульфата натрия до сульфата натрия. Как видно из описанного метода, адсорбированная мелочь и неотмытые соли натрия переходят в окислительной среде в хромат и сульфат натрия, которые затем выщелачивают из спека. В дальнейшем пульпа окиси хрома фильтруется, сушится и упаковывается в качестве товарного продукта.

Технологическая схема очистки газов, отходящих от прокалочной печи, включает следующие процессы.

Из баков дозаторов паста ГОХ пневмодозаторами через питательную форсунку подается в прокалочную печь. При наличии в пасте элементарной серы, она выгорает в печи с образованием сернистого газа.

Прокалочная печь обогревается топочными газами от сжигания природного газа. В прокалочной печи при температуре (1200 - 1400) °С происходит полное обезвоживание гидроокиси хрома и перевод адсорбированной щелочи в хромат натрия. Одновременно неотмытый тиосульфат натрия окисляется до сульфата натрия. Первоначально в схеме очистки, отходящие газы, содержащие пыль, из печи поступали на очистку в полые скруббера, орошаемые с помощью эвольвентных форсунок фильтратом 1,2 стадий фильтрации ГОХ. Фильтрат поступал в баки орошения скрубберов печей из баков- сборников фильтрата.

С увеличением концентрации, пульпа из баков орошения ПГУУ печей откачивалась через приемный бак-гаситель в отстойники «Дорра». Осветленная часть из отстойников «Дорра» поступает в бак-сборник осветленных растворов, откуда насосом откачивают на контрольную фильтрацию на фильтр-пресс. Образующийся после контрольной фильтрации технологических растворов шлам, поступает в бак шламооткачки. Твердая часть из отстойников «Дорра» и фильтр-прессов подается в бак доработки пульпы ГОХ.

Обследование существующей схемы очистки показали следующие предельные значения рабочих параметров: расход газа на входе в скруббера 24400÷31580 м<sup>3</sup>/ч; температура газа – на входе 76-82°С; концентрация улавливаемых компонентов: пыль неорганическая – 1,03÷1,94 г/с; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,926- 2,47 г/с; CrO<sub>3</sub>- 0,0012- 0,014 г/с; оксид углерода- 0,92- 0,98 г/с; диоксид азота- 0,014- 0,18 г/с. Результаты обследований показали невысокую эффективность полых форсуночных скрубберов. Для увеличения степени очистки рекомендовано реконструировать существующую технологическую схему. В процессе реконструкции схемы очистки газов, отходящих от прокалочной печи, были убраны два полых скруббера, а взамен установлен инерционно-турбулентный аппарат (ИТА).

Аппарат ИТА включает две контактные зоны. Поступающий на очистку газ входит в нижнюю часть аппарата через входной патрубок, расположенный над зеркалом жидкости. Имея повышенную скорость, запыленный газовый поток ударяется о поверхность жидкости, в результате чего твердые частицы выпадают и оседают в жидкости. Уровень орошающей жидкости в нижней части аппарата поддерживается постоянным.

Вторая зона контакта по ходу движения газового потока отделена от зоны ударного взаимодействия газа и жидкости наклонной перегородкой с патрубками для прохода газа. Эта контактная зона снабжена регулярной пластинчатой насадкой и оросителем в верхней части аппарата для обеспечения противоточного взаимодействия частично очищенного газового потока с орошающей жидкостью. Орошение контактных зон производится автономно. При этом в качестве орошающей жидкости используется фильтрат 1,2 стадий фильтрации ГОХ.

Аппарат ИТА позволяет реализовать два механизма улавливания твердых частиц: ударный и диффузионный, а также диффузионный механизм абсорбции газообразных продуктов. При этом обеспечивается автономное орошение контактных зон.

Результаты, полученные при испытании имели следующие предельные значения параметров: расход газа на входе в аппарат 22900÷31750 м<sup>3</sup>/ч; температура газа – на входе 77-84°С; концентрация улавливаемых компонентов: пыль неорганическая – 0,068÷0,0805 г/с; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,0012- 0,0024 г/с; CrO<sub>3</sub>- 0,0004- 0,0009 г/с; оксид углерода- 0,038- 0,057 г/с; диоксид азота- 0,004- 0,0057 г/с. Полученные данные показали высо-

кую эффективность очистки улавливаемых компонентов и сравнительно низкие энергозатраты.

С целью снижения температуры очищаемого газового потока и дальнейшего повышения эффективности газоочистного аппарата было предложено модернизировать насадочную зону и узел подачи газового потока в аппарат. Для этого регулярная пластинчатая насадка была заменена на трубчатый пучок, установленный внутри корпуса и представляющей собой коллекторы для сбора и перераспределения жидкости в виде кольца с решеткой из труб. Перетекание теплоносителя от одного коллектора к другому осуществляется через вертикальные трубы. Такое исполнение трубчатой насадки обеспечивает максимальное использование закономерностей взаимодействия вихрей, заключающееся в достижении режима одновременного вихреобразования (синфазного режима). Жидкость в трубчатом пучке, используемая в качестве теплоносителя (техническая вода), не взаимодействует с поглотительным раствором, орошающим трубчатый пучок. Вместе с тем за счет контакта через стенки труб теплоноситель в трубах отнимает избыточное тепло газожидкостного потока, тем самым снижая температуру газового потока.

Модернизация узла подачи газового потока в аппарат заключалась в том, что в газоподводящем патрубке в зоне выхода газа соосно устанавливается штуцер, через который подается теплоноситель из нижнего коллектора трубчатой насадки, расположенной в верхней ступени контакта. Объединенный поток газа и теплоносителя с высокой скоростью ударяется о поверхность жидкости, находящейся в нижней части аппарата. При ударе содержащиеся в газовом потоке твердые частицы за счет сил инерции осаждаются в жидкости. Введение теплоносителя через входной газовый патрубок обеспечивает необходимую подпитку для поддержания заданного уровня жидкости относительно нижнего среза входного патрубка в нижней части аппарата. Кроме того, организация подачи теплоносителя в зону ударного взаимодействия способствует постоянному контакту запыленного газового потока со свежей жидкостью.

Результаты, полученные при испытании имели следующие предельные значения параметров: расход газа на входе в аппарат  $23100 \div 31980 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; температура газа – на входе  $75-88^\circ\text{C}$ ; температура газа – на выходе  $60-72^\circ\text{C}$ ; концентрация улавливаемых компонентов: пыль неорганическая –  $0,058 \div 0,068 \text{ г/с}$ ;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  –  $0,00102- 0,002 \text{ г/с}$ ;  $\text{CrO}_3$ -  $0,00034- 0,00077 \text{ г/с}$ ; оксид углерода-  $0,032- 0,048 \text{ г/с}$ ; диоксид азота-  $0,0032- 0,0047 \text{ г/с}$ .

В результате проведенных испытаний установлено снижение показателей основных исследуемых параметров. Температура отходящих газов снижена на  $15-17^\circ\text{C}$ ; концентрация твердых и газообразных примесей в среднем на  $14-18\%$ . Кроме того, за счет установки трубчатого пучка произошло снижение гидравлического сопротивления в  $\sim 1,3$  раза (для аппара-



## ПРИЛОЖЕНИЕ И

« УТВЕРЖДАЮ»

Председатель правления

АО «АЗХС»

Химич А.А.

2021г.



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских  
и опытно- конструкторских работ

ЗАКАЗЧИК – АО «Актюбинский завод хромовых соединений».  
НАСТОЯЩИМ АКТОМ ПОДТВЕРЖДАЕТСЯ, что результаты работы  
«Реконструкция газоочистного аппарата в технологической схеме  
производства окиси хрома металлургической»,  
ВЫПОЛНЕННОЙ работниками АО «Актюбинский завод хромовых  
соединений» и ЮКУ им М.О.Ауэзова,  
ПРОВОДИМОЙ в период 01.01.2021г. по 31.12.2021г.  
ВНЕДРЕННЫ на АО «Актюбинский завод хромовых соединений».

**1. Вид внедряемых результатов:** техническая документация на двухзонный комбинированный газоочистного аппарат с регулярной трубчатой насадкой и методика его расчета.

**2. Характеристики масштаба внедрения:** единичное.

**3. Форма внедрения:** промышленная установка.

**4. Новизна результатов научно-исследовательских работ:** технически новое решение по конструкции двухзонного комбинированного газоочистного аппарата с регулярной трубчатой насадкой

**5. Опытно-промышленная проверка:** промышленные испытания двухзонного комбинированного газоочистного аппарата с регулярной трубчатой насадкой, установленного для очистки газов, отходящих от прокаточной печи в производстве окиси хрома металлургической (цех №4) проведены в период с 24.05.21г по 30.07.21г.

**6. Внедрен:** двухзонный комбинированный газоочистного аппарат с регулярной трубчатой насадкой в схеме очистки газов, отходящих от прокаточной печи №1 в производстве окиси хрома металлургической (цех №4).

**7. Достигнутые результаты:** снижена - температура отходящих газов на 15-17<sup>0</sup>С; концентрация твердых и газообразных примесей в среднем на 14-18%; за счет установки трубчатого пучка произошло снижение

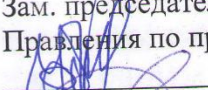
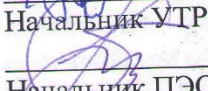
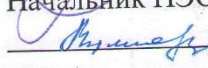
гидравлического сопротивления в ~1,3 раза (для аппарата с пластинчатой насадкой  $\Delta P = 2-2,5$  кПа; для аппарата с трубчатой насадкой  $\Delta P = 1,5-1,95$  кПа).

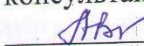
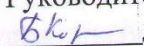
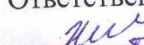
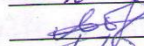

**8. Объем внедрения:** одна технологическая линия.

**9. Социальный и научно-технический эффект:** снижение воздействия вредных выбросов (концентрация выбрасываемой пыли в окружающую среду 6,27 раза ниже нормативного показателя) и температуры (снижение в среднем на 15-17<sup>0</sup>С) на окружающую среду, извлечение целевого продукта, улучшение условий труда.

ПРИЛОЖЕНИЕ: Акт промышленных испытаний.

Акт подписали:

От АО «АЗХС»  
Зам. председателя  
Правления по производству  
 Арсланов Ф.А.  
Начальник УТР  
 Бульбин С.В.  
Начальник ПЭО  
 Чуюнова А.В.

от ЮКУ им. М.Ауэзова  
Руководитель темы, научный  
консультант  
 д.т.н., проф. А.А.Волненко  
Руководитель группы  
 д.т.н. Б.Н. Корганбаев  
Ответственные исполнители:  
 с.н.с. Д.К. Жумадуллаев  
 м.н.с. А.А. Абжапбаров  
 м.н.с. Д.К. Камалбек



## ПРИЛОЖЕНИЕ К

«УТВЕРЖДАЮ»

Председатель правления  
АО «Актюбинский завод  
хромовых соединений».

Химич А.А.  
« 2 » \_\_\_\_\_ 2021г.



### РАСЧЕТ

#### эффективности природоохранных мероприятий по защите атмосферы от загрязнений в производстве окиси хрома металлургической (акт внедрения от 30.07.2021года).

Установление экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды осуществляется на основании «Правил экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды» [1].

Экономическая оценка ущерба косвенным методом от загрязнения атмосферного воздуха выбросами от стационарных источников и от сжигания газа на факелах, сверхустановленных нормативов по *i*-ому ингредиенту определяется по формуле:

$$U_i = (C_{\text{факт}i} - C_{\text{норм}i}) \times 3\,600/1\,000\,000 \times A_i \times T \times 2,2 \text{ МРП} \times 10 \times K_1 \times K_2 \quad (1)$$

где:  $U_i$  – экономическая оценка ущерба от загрязнения атмосферного воздуха от стационарных источников и от сжигания газа на факелах, *i*-ым ингредиентом, тенге;

$C_{\text{факт}i}$  – фактический выброс *i*-ого загрязняющего вещества, выявленный в ходе государственного либо производственного экологического контроля, г/сек;

$C_{\text{норм}i}$  – норматив выброса *i*-ого загрязняющего вещества, г/сек;

$A_i$  – коэффициент относительной опасности, определяемый по формуле:

$A_i = 1/\text{ПДК}_{\text{сс}}$ , где  $\text{ПДК}_{\text{сс}}$  – предельно допустимая среднесуточная концентрация загрязняющего вещества в атмосферном воздухе;

$T$  – время работы оборудования за период нанесения ущерба, принимаемое за время, прошедшее с последней проверки, проведенной в ходе государственного либо производственного экологического контроля (в часах);

МРП – месячный расчетный показатель, установленный законодательными актами на соответствующий финансовый год;

10 – повышающий коэффициент;

$K_1$  – коэффициент экологической опасности (определяется по приложению 1 [1]);

$K_2$  – коэффициент экологического риска (определяется по приложению 2 [1]).

Замеры концентраций вредных веществ, согласно акта испытаний, содержат данные по пыли неорганической, окиси хрома, хромовому

ангидриду и газообразным примесям (оксиду углерода и диоксиду азота). В производстве окиси хрома металлургической наиболее вредными компонентами, выбрасываемыми с отходящими газами, являются твердые частицы, содержащие хром. Проведем расчет по выбросам пыли. При обследовании схемы очистки, включающей полые скруббера суммарная концентрация пылевых выбросов составила  $C_{\text{факт}} = 3,19$  г/сек. При установке инерционно-турбулентного аппарата (ИТА) суммарная концентрация пылевых выбросов была снижена и составила  $C_{\text{факт}} = 0,0858$  г/сек. При установке двухзонного комбинированного газоочистного аппарата с регулярной трубчатой насадкой суммарная концентрация пылевых выбросов составила  $C_{\text{факт}} = 0,06506$  г/сек.

Экономическая оценка ущерба по уравнению (1) при следующих значениях входящих в него величин для полых скрубберов:

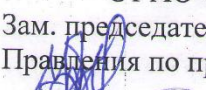
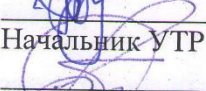
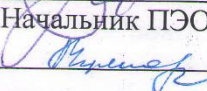
$C_{\text{факт}} = 3,19$  г/сек;  $C_{\text{норм}} = 0,408$  г/сек;  $A = 1/\text{ПДК}_{\text{сс}} = 66,7$  где  $\text{ПДК}_{\text{сс}} = 0,015$  мг/м<sup>3</sup> для пыли в пересчете на Cr(VI);  $T = 7200$  час;  $\text{МРП}(2021) = 2917$  тенге;  $K_1 = 1$ ;  $K_2 = 1$  составила:

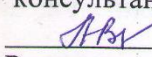
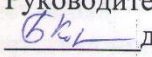
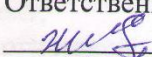


$$U_1 = (3,19 - 0,408) \times 3\,600 / 1\,000\,000 \times 66,7 \times 7200 \times 2,2 \times 2917 \times 10 \times 1 \times 1 = 30\,894\,613,03 \text{ тенге или } 30,9 \text{ млн.тенге.}$$

Выполнение расчета для экономической оценки ущерба инерционно-турбулентного аппарата и двухзонного комбинированного газоочистного аппарата с регулярной трубчатой насадкой не представляется возможным, так как концентрация выбрасываемой пыли в окружающую среду значительно ниже нормативного показателя (в 4,76 и 6,27 раза, соответственно).

### Литература

1 Правила экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды /Постановление Правительства Республики Казахстан от 27 июня 2007 года N 535

От АО «АЗХС»  
Зам. председателя  
Правления по производству  
 Арсланов Ф.А.  
Начальник УТР  
 Бульбин С.В.  
Начальник ПЭО  
 Чуянова А.В.

от ЮКУ им. М.Ауэзова  
Руководитель темы, научный  
консультант  
 д.т.н., проф. А.А.Волненко  
Руководитель группы  
 д.т.н. Б.Н. Корганбаев  
Ответственные исполнители:  
 с.н.с. Д.К. Жумадуллаев  
 м.н.с. А.А. Абжапбаров  
 м.н.с. Д.К. Камалбек

## ПРИЛОЖЕНИЕ Л



### АКТ

внедрения НИР по диссертации Абжапбарова А.А. на тему «Гидродинамика, тепломассообмен и пылеулавливание в однозонных и двухзонных комбинированных газоочистных аппаратах» на соискание ученой степени PhD, выполненной в соответствии с госбюджетной НИР 21-03-04 «Разработка методики конструирования и расчета высокоэффективных тепломассообменных аппаратов и устройств общепромышленного назначения» в учебный процесс.

Настоящий акт составлен по итогам НИР, выполненной на кафедре «Технологические машины и оборудование» в 2020-2022 годах.

В результате проведенных НИР получены расчетные зависимости для определения основных гидродинамических характеристик, параметров тепло и массообмена и пылеулавливания, составляющие основу инженерных методик расчета. Основные результаты были опубликованы в журналах: 1. Torskiy A.O., Zhumadullaev D.K., Volnenko A.A., Abzhapbarov A.A., Korganbaev B.N. Calculation of hydrodynamic characteristics of a cyclonic-vortex apparatus // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, V.8, №9, 2020. – P. 6091-6097. [https://doi.org/10.30534/ij\\_eter/2020/194892020](https://doi.org/10.30534/ij_eter/2020/194892020) 2. Abzhapbarov A.A., Volnenko A.A., Korganbaev B.N., Levdanskiy A.E. Application of combined apparatus for intensification of dust collection and absorption processes // VII International Conference of «Industrial Technologist and Engineering» (ICITE 2020), Shymkent, Kazakhstan, November 12-13, 2020, V.1. – P.236-241

*(краткое описание научных результатов)*

Настоящим актом подтверждается, что результаты НИР по созданию одноступенчатого двухзонного газоочистного аппарата с двухсторонним подводом газового потока, двухступенчатых аппаратов с ударно-вихревым и циклонно-вихревым взаимодействием потоков и их методики расчета.

выполненные докторантом Абжапбаровым А.А.  
*(должность, степень, звание, ф.и.о.)*

под руководством д.т.н., профессора Волненко А.А. и д.т.н., доц. Левданского А.Э. внедрены  
*(должность, степень, звание, ф.и.о.)*

в учебный процесс:

в лекционные занятия «Аппараты с подвижной и регулярной насадкой для процессов тепломассообмена и пылеулавливания» в разделе «Газопылеулавливающие оборудование»  
*(указывается наименование дисциплины и ее разделы)*

в практические занятия «Аппараты с подвижной и регулярной насадкой для процессов тепломассообмена и пылеулавливания» для выполнения расчетов по заданию «Расчет аппаратов с ударно-вихревым и циклонно-вихревым взаимодействием потоков»  
*(указывается наименование дисциплины и ее разделы)*

Зав. кафедрой Сейтханов Н.Т.  
*(подпись)*

Научный руководитель темы  
Волненко А.А.  
*(подпись)*

Начальник отдела координации  
научной деятельности  
Серкебаев М.К.  
*(подпись)*

Директор ДАВ  
Наукенова А.С.  
*(подпись)*  
Директор ДАН  
Назарбек У.Б.  
*(подпись)*