

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 03.04.02 «Физика»  
 Отделение подготовки (НОЦ) Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова  
 Профиль Производство, транспорт и хранение сжиженного природного газа

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование сепарационных характеристик инерционных аппаратов используемых для отчистки природного газа от механических примесей

УДК 621.928.1:531.23-047.37:662.767

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ71	Захаров Дмитрий Дмитриевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	Разва Александр Сергеевич	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель кафедры менеджмента	Подопригора Игнат Валерьевич	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Гуляев Милий Всеволодович	—		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель Отделения /НОЦ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель профиля	Максимов Вячеслав Иванович	к.т.н., доцент		

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП 03.04.02**  
**Физика, магистратура**

Код результата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)
<b>Общекультурные (универсальные) компетенции</b>	
P1	Понимает необходимость самостоятельного обучения и повышения квалификации в течение всего периода профессиональной деятельности.
P2	Проявляет способность эффективно работать самостоятельно в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, быть лидером в команде, консультировать по вопросам проектирования научных исследований, а также быть готовым к педагогической деятельности.
P3	Умеет находить зарубежных и отечественных партнеров, владеет иностранным языком, позволяющим работать с зарубежными партнерами с учетом культурных, языковых и социально-экономических условий.
P4	Проявляет понимание используемых методов, области их применения, вопросов безопасности и здравоохранения, юридических аспектов, ответственности за профессиональную деятельность и ее влияния на окружающую среду.
P5	Следует кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научно-исследовательской деятельности.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P6	Проявляет глубокие естественнонаучные, математические профессиональные знания в проведении научных исследований в перспективных областях профессиональной деятельности.
P7	Принимает участие в фундаментальных исследованиях и проектах в области физики металлов и материаловедения, а также в модернизации современных и создании новых методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел.
P8	Способен обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности.
P9	Способен применять полученные знания для решения нечетко определенных задач, в нестандартных ситуациях, использует творческий подход для разработки новых оригинальных идей и методов исследования в области физики металлов, материаловедения и термообработки.
P10	Способен планировать проведение аналитических имитационных исследований по профессиональной деятельности с применением современных достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области научных исследований, умеет критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делает выводы, знает правовые основы в области интеллектуальной собственности
P11	Умеет интегрировать знания в различных и смежных областях научных исследований и решает задачи, требующие абстрактного и креативного мышления и оригинальности в разработке концептуальных аспектов проектов научных исследований

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 03.04.02 Физика  
 Отделение школы (НОЦ) НОЦ И.Н.Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)                      (Дата)                      (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

в форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5ФМ71	Захаров Дмитрий Дмитриевич

Тема работы:

Исследование сепарационных характеристик инерционных аппаратов используемых для очистки природного газа от механических примесей

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№837/с от 04.02.2019 г.
---	-------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<p>Объект исследования – воздушный поток, содержащий механические включения (глинозём). Требования к продукту – оценка сепарационных характеристик инерционных аппаратов; Экспериментальные мероприятия по определению эффективности пылеулавливания. Исходные данные: физические характеристики механических включений и воздушного потока.</p>
--	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>1. Обзор источников по теме. Обоснование необходимости разработки.  2. Проведение экспериментальных исследований для оценки сепарационных характеристик инерционных аппаратов. 3. Выполнение работ по исследованию влияния компоновки и схематических решений обеспыливающих устройств на эффективность работы 4. Проведение лабораторных испытаний разработанных обеспыливающих устройств 5. Экономическая оценка наиболее выгодных и эффективных мероприятий 6. Социальная ответственность данного производства.  7. Формулировка выводов и заключения.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p>	<p>Количество слайдов шт.</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Подопригора Игнат Валерьевич</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Гуляев Милий Всеволодович</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Введение, обзор литературы, материалы и методы, результаты, заключение (русский), обзор литературы (английский)</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ</p>	<p>Разва Александр Сергеевич</p>	<p>к.т.н.</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>5ФМ71</p>	<p>Захаров Дмитрий Дмитриевич</p>		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 124 стр. содержит 28 иллюстраций, 31 таблицу, 90 источников литературы.

Ключевые слова: пыль, очистка газа, инерционные аппараты, циклон, затвор непрерывной выгрузки, пыле-концентратор, механические примеси.

Целью настоящей работы является исследование сепарационных характеристик инерционных аппаратов используемых для очистки природного газа от механических примесей, выносимых с углеводородной продукцией из скажин эксплуатационного фонда.

Для достижения цели исследования ставятся и решаются следующие задачи:

1. Модернизация конструкции систем аспирации:

а) Разработка дозатора дисперсного материала;

б) Исследование и доработка работоспособности затворов непрерывной выгрузки из циклона.

2. Провести анализ существующих систем по очистке природного газа;

3. Сконструировать экспериментальный стенд для исследования;

4. Провести экспериментальные исследования системы газоочистки при различных компоновках её элементов.

В результате исследования была проведена оценка сепарационных характеристик путем модернизации конструкции инерционных аппаратов.

По завершению исследования был проведен анализ наиболее экономичного метода проведения исследования и обработки результатов, а также приведена оценка социальной ответственности.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

### Определения

В настоящей работе применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Фильтр – аппарат, приспособление или пористое тело, предназначенные для очищения газа или жидкости от взвешенных в них твердых или жидких частиц путем процеживания.

Очистка (природного газа) – удаление из природного газа нежелательных компонентов, затрудняющих его использование в качестве топлива или сырья или загрязняющих окружающую среду

Компримирование – повышение давления газа с использованием компрессора.

Пылеуловитель – аппарат для очистки газа от взвешенных частиц.

Сепарация - разделение жидких и газообразных неоднородных систем, а также твердых или жидких смесей под действием каких-либо сил.

### Обозначения и сокращения

СПГ – сжиженный природный газ;

ОПО – опасный производственный объект;

УКПГ – установка комплексной подготовки газа;

УОГ – установка очистки газа;

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	8
1 Обзор литературы.....	10
1.1 Основные понятия и схемы очистки природного газа от механических примесей.....	17
1.2 Аппараты сухой инерционной очистки газов.....	26
1.3 Инерционные пылеуловители .....	27
1.4 Циклоны.....	30
1.4.1 Общая характеристика конструкций циклонов .....	30
1.4.2 Прямоточные циклоны. ....	31
1.4.3 Противоточные циклоны.....	33
1.4.4 Групповые и батарейные циклоны.....	38
1.5 Вихревые и динамические пылеуловители. ....	44
1.6 Недостатки существующих методов очистки природного газа от дисперсных примесей.....	46
2. Обеспыливание инерционными аппаратами.....	48
2.1 Описание экспериментального стенда.....	50
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	57
3.1. Планирование работ и оценка времени их выполнения .....	57
3.1.1 Смета затрат на проект .....	58
3.1.2 Материальные затраты .....	58
3.1.3 Амортизация компьютерной техники.....	58
3.1.4 Затраты на заработную плату.....	59
3.1.5 Затраты на социальные нужды.....	59
3.1.6 Прочие затраты .....	60
3.1.7 Накладные расходы .....	60
3.2. Смета затрат на оборудование и монтажные работы.....	61
Вывод.....	61

## ВВЕДЕНИЕ

Потоки газов со взвешенными частицами все чаще используются в современных технологических процессах. Важные технические решения связаны с широким использованием проточных химических реакторов и пневмотранспортных установок главным образом в целях автоматизации производства.

В настоящее время для обеспыливания и очистки газов применяют сухие и мокрые пылеулавливающие и газоочистные аппараты. В зависимости от сил и физико-химических эффектов, используемых для осаждения пыли, эти аппараты разделяют на следующие обширные по конструктивным особенностям группы:

а) пылеосадительные камеры, в которых для осаждения пыли в основном используют силу тяжести;

б) аспирационно-коагуляционные шахты, где на осаждение пыли помимо гравитации влияет эффект коагуляции частиц;

в) циклоны, жалюзийные и другие инерционные аппараты, в которых дисперсные материалы осаждаются, когда поток газа вращается или поворачивается под действием сил инерции, многократно превышающих силу тяжести; при этом осаждаются в основном частицы размером свыше 5-10 мкм;

г) мокрые скрубберы (с насадкой, центробежные), ротоклоны, пенные и турбулентные аппараты, в которых помимо сил тяжести, возросших в результате увлажнения частиц, используется броуновская диффузия и др.; в этих аппаратах осаждаются частицы более 3-5 мкм; лишь в высокоскоростных (100-150 м/с) турбулентных пылеуловителях осаждаются частицы размером менее 1 мкм;

д) электрофильтры пластинчатые и трубчатые с горизонтальным или вертикальным движением запыленного потока через электрическое поле высокого напряжения, где газ ионизируется, а твердые частицы заряжаются ионами и под действием указанного поля осаждаются на электродах;

е) фильтры тканевые, волокнистые и зернистые, в которых газ обеспыливается, проходя через ткань, слой волокон, песка, гравия, и т.п.; при этом также используются инерционные, электрические, гравитационные и другие силы.

Сепарационные характеристики пылеуловителей зависят не только от типа, конструкции, размеров и режимов работы, но также в значительную роль играют от физико-химических свойства аэрозолей, поступающих на обезболивание, поэтому свойства аэрозолей следует изучать и учитывать при выборе пылегазоочистных установок, а при необходимости регулировать, изменяя технологическое оборудование и процессы; наряду с этим необходимо знать конструкции пылегазоочистных аппаратов и физическую сущность процессов, протекающих в них, чтобы при необходимости соответственно регулировать режимы их работы.

## 1 Обзор литературы

Добываемый из месторождения природный газ обычно содержит механические примеси. Под механической примесью понимаются все инородные вещества в жидком, твердом и газообразном состоянии, входящие в состав природного газа и снижающие его теплоту сгорания. Твердые включения состоят из различных сложных химических веществ: окиси алюминия, соединений кремния, железа, кальция, магния, серы и др.; под жидкими и газообразными включениями подразумеваются вода, ее пары и пары солей, образовавшихся при высоком давлении.

сложных химических веществ: окиси алюминия, соединений кремния, железа, кальция, магния, серы и др.; под жидкими и газообразными включениями подразумеваются вода, ее пары и пары солей, образовавшихся при высоком давлении.

В современной науке и технике интерес , который проявляют к проточным (сквозным) дисперсным системам, можно объяснить следующими факторами:

1. Эти системы отличаются полной проточностью как сплошной, так и дискретной сред. Поэтому они позволяют перейти к непрерывным процессам, обеспечить противоток в различных технологических и тепловых процессах; дисперсные потоки можно использовать в качестве рабочего тела.

2. “Запыленные потоки могут быть следствием (в ряде случаев нежелательным) реализации определенных технологических процессов. В любом случае эффективность этих процессов зависит от правильной организации и использовании потоков газозвеси.”

3. “При отсутствии ограничений со стороны технологии можно в определенных, но достаточно широких пределах осуществлять эффективное управление свойствами газового потока путем соответствующего выбора качества и количества твердых частиц, специально вводимых в поток.”

4. Изучение поведения твердых частиц в газовых потоках имеет важное значение для разработки средств предотвращения загрязнения атмосферы.

Зарубежный и отечественный опыт эксплуатации магистральных газопроводов свидетельствует о значительных трудностях, называемых запыленным газом. Известны многократные случаи оборудования. Особо высокой надежностью в работе должны отличаться пылеочистительные установки на компрессорных и газораспределительных станциях. Причиной быстрого износа оборудования бывают случаи установки на компрессорных станциях новых, предварительно не испытанных конструкций пылеуловителей.

Достоверно установлено, что износ рабочих колес пропорционален расходу пыли. Наиболее опасными с точки зрения эрозионного воздействия на металл рабочих колес нагнетателя являются фракции пыли более 20 мк. Мелкие фракции увлекаются потоком газа, не изменяя существенно геометрии элементов колеса. При воздействии на металл потока газа со смоченной пылью интенсивность эрозии возрастает.

В настоящее время, для изучения процесса по очистке природного газа от механических примесей разрабатываются инерционные аппараты с функцией совмещенного пылеулавливания и возможностью перемещения очищаемой среды. Автор данной работы [1] представляет результаты исследования обеспыливания газов инерционными аппаратами, для решения вопросов, касающихся охраны труда и защиты окружающей среды от загрязнений. Сепарация природного газа от твердых частиц осуществляется на основе экспериментальных, эксплуатационных данных применения пылеочистительных устройств. Проведены испытания систем обеспыливания газов в производственных условиях. Суть выполнения этих испытаний заключается в определении эффективности обеспыленного воздуха пневмотранспортной установкой в условиях нестационарности потоков в узле и анализировании методов определения связности дисперсного материала. Исследуются аэромеханические процессы в ротационных аппаратах, в которых

рассмотрены эффективности сепарации частиц во вращающихся каналах ротора.

Так для примера, авторы работы [2] дают системное представление технологического процесса подготовки природного газа. В ходе данного исследования, используя нейронные сети и теории нечеткого логического вывода можно построить математическую модель, позволяющую смоделировать технологический процесс.

Выпускаемые в настоящее время аппараты аспирации природного газа, располагаемые перед головными газорегуляторными пунктами (ГРП), характеризуются высокой металлоемкостью, малым периодом между соседними операциями по очистке с поверхностей фильтрующих элементов и, как результат, большими расходами по периодическому удалению механических примесей. Авторы статей [3, 5, 6] приводят конструкторское решение повышения удельной пропускной способности УГО. Снижение металлоемкости и затрат в операции по устранению твердых частиц. При использовании сетчатых фильтрующих элементов результат расчетов по технико-экономическому сравнению установок показал, что средняя величина экономии составляет 74,5% в отличие от установок очистки от более крупных твердых частиц на основе волокнистых фильтрующих элементов для всех УГО природного газа.

Математическая модель, рассматривающая все независимые геометрические характеристики, представлена в работах [7,8,29], которая служит для подбора аппарата грубой очистки природного газа. Не требует конечного результата применения серии промежуточных формул, а также применима для технико-экономического сравнения всех разновидностей установок очистки, используемых в системах газораспределения.

Модель содержит в себе структурную схему, целевую функцию интегральных затрат, балансовое уравнение, концепцию ограничений управляющих характеристик и дает возможность в основе системного подхода привести все конкурирующие варианты к общей структуре и принимать во

внимание динамику формирования системы грубой очистки.

Расчетная модель сопоставляемых вариантов системы грубой очистки газа от механических примесей представлена на рис. 1.

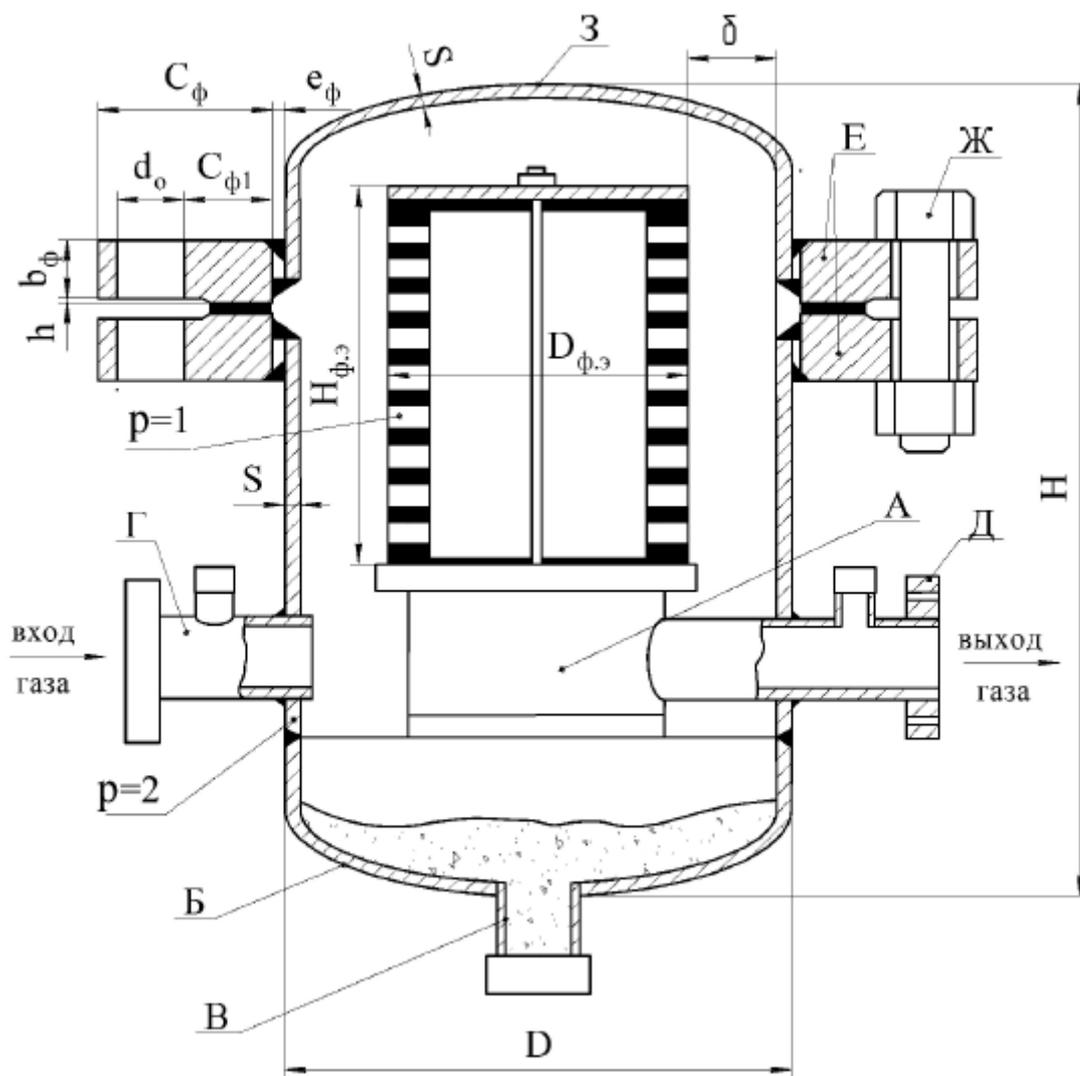


Рис.1. Схема установки грубой очистки газа от взвешенных частиц:

А – стакан для крепления ФЭ; Б – накопитель твердых частиц;

В – патрубок для продувки и удаления ТЧ; Г, Д – входной и выходной патрубки; Е – фланцы, необходимые для выема ФЭ; Ж – болтовые соединения фланцев Е; З – крышка

На расчетной схеме сравниваемые варианты приведены к общей структуре, т.е. к одинаковой форме, и обладают равным числом элементов  $p$ : фильтрующий элемент ( $p = 1$ ); блок-корпус фильтра ( $p = 2$ ).

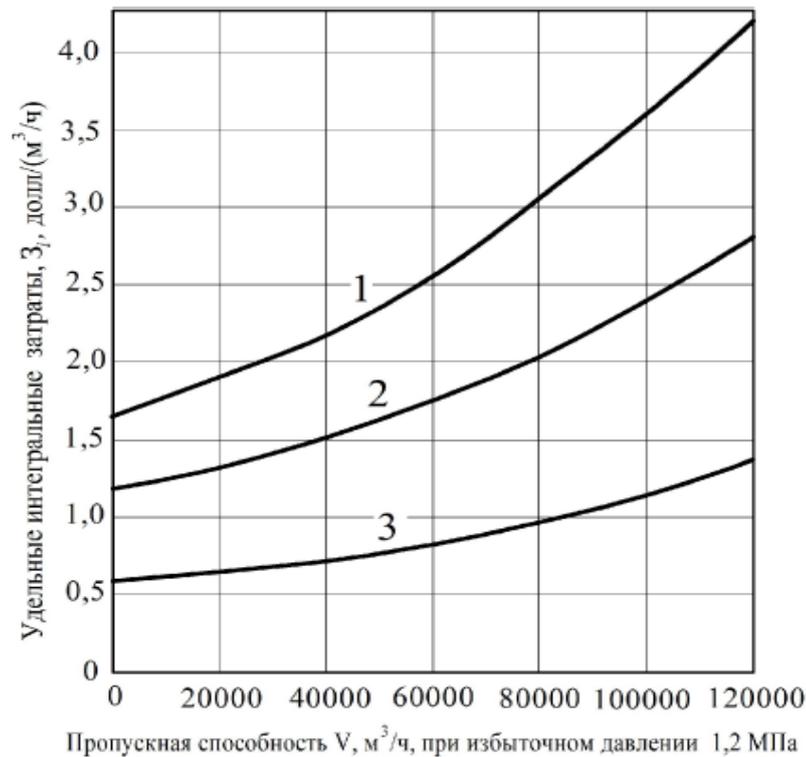


Рис.2. График зависимости удельных интегральных затрат от их пропускной способности:

- 1 - металлопористый фильтрующий элемент ( $i = 1$ );
- 2 - волоконный фильтрующий элемент ( $i = 2$ );
- 3 - сетчатый фильтрующий элемент ( $i = 3$ )

На графике видно, что при использовании установки с сетчатым фильтрующим элементом величина экономии равняется 74,5% (линия № 3) по экономической эффективности близкому к устройству обеспыливания на основе волоконного фильтрующего элемента (линия № 2) для всего ряда очистительных установок.

Также расчеты, которые были проведены дополнительно показывают, что в конечном результате благодаря четырехкратному снижению количества замен сетчатого фильтрующего элемента по сравнению с волоконным за период срока службы установки происходит уменьшение длительности очистки фильтрующего элемента от крупных взвешенных частиц на 34,3 %.

В статье [9,17,18] рассматривается схема очистки газа от механических частиц при помощи прямоточно-центробежного сепаратора. Были получены новые данные по структуре течения, а также по основным характеристикам

сепаратора, благодаря проведенным экспериментальным и расчетным данным.. Были обнаружены воздействия размера частиц на степень очистки газа от механических примесей, длины вихревой камеры, а также ширины сепарационной щели, наличия или отсутствия отсоса из контейнера сбора частиц.

На рисунке 3 представлена газодинамическая установка, работающая на отсасывание.

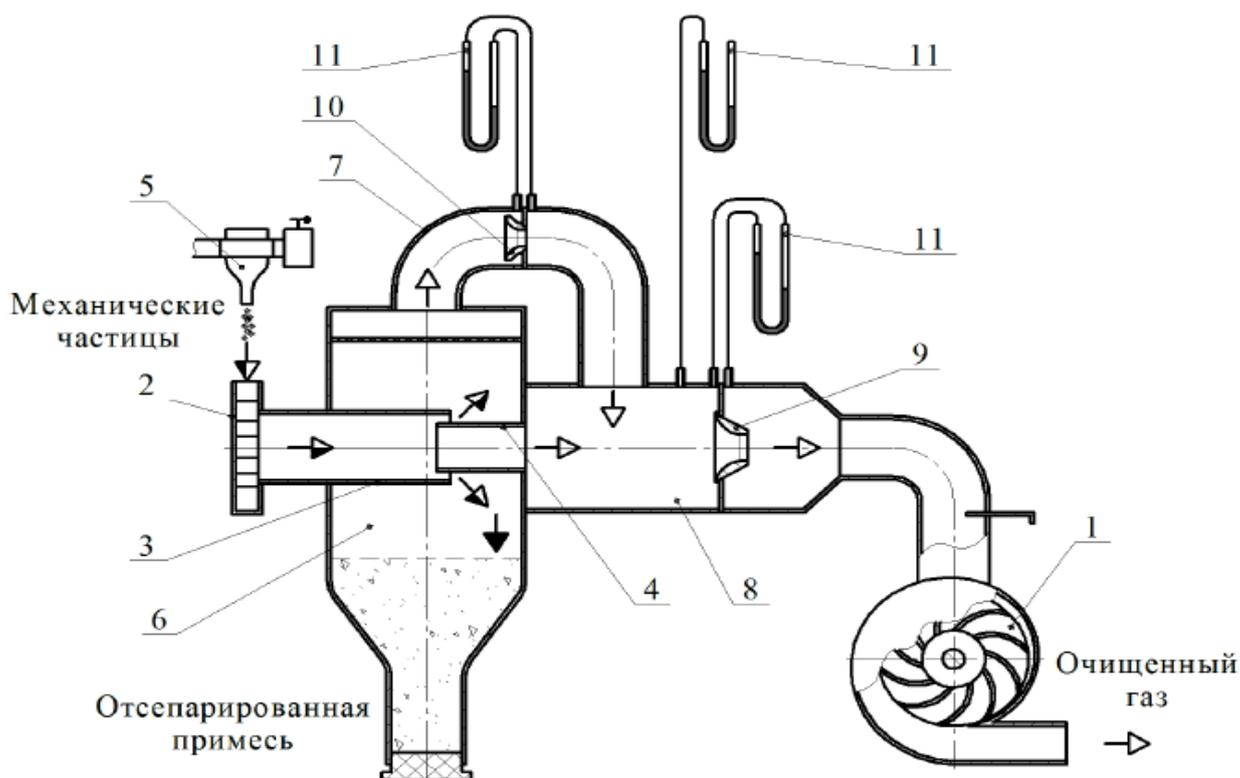


Рис.3. Схема прямоточно-центробежного сепаратора:

1 – вентилятор; 2 – тангенциальный лопаточный завихритель; 3 – вихревая камера; 4 – патрубок отвода очищенного газа; 5 – дозатор подачи частиц; 6 – контейнер сбора отсепарированной примеси; 7 – трубопровод отсоса газа; 8 – коллектор;

9, 10 – мерные сопла; 11 – U-образный манометр

Структура закрученного потока, распространяющегося в аксиальном направлении, определяется числом крутки. От числа крутки зависит структура закрученного потока, движущегося в аксиальном направлении. Представляет собой отношение аксиального потока момента количества движения к

аксиальному полному количеству движения в произвольном сечении струи или трубы.

Результат работы помог выявить, что отсутствие отсоса в области нахождения щели дает возможность концентрироваться мелким частицам тем самым, снижая степень очистки на 8-10% .

“Современные аппараты очистки природного газа от механических примесей характеризуются низкой пропускной способностью, высокой металлоемкостью и значительными затратами по периодическому удалению твердых частиц. В работах [10,14,15] представлены технические решения по предотвращению указанных недостатков путем расположения в одном общем корпусе установки очистки природного газа необходимого количества параллельно соединенных между собой фильтрующих элементов.

Использование предлагаемых установок позволяет увеличить площадь фильтрующих поверхностей на каждую единицу объема корпуса установок очистки природного газа, снизить их удельную металлоемкость и затраты по периодическому удалению твердых частиц, уменьшить площадь помещений газорегуляторных пунктов, необходимую для размещения установок очистки и обеспечить гибкость подбора установок очистки с требуемой фильтрующей поверхностью путем изменения в них количества фильтрующих элементов [41,45].”

Применение существующих установок по очистке природного газа от механических примесей, включающих в себя ряд параллельно соединенных между собой фильтрующих элементов, разделенных между собой сплошными пластинами, позволяет:

1. повысить удельную пропускную способность УГО путем увеличения площади фильтрующих поверхностей на каждую единицу объема корпуса установок очистки и, как следствие, снизить их удельную металлоемкость;
2. обеспечить возможность гибкого наращивания мощности эксплуатируемых установок очистки, путем увеличения в них числа средних блоков очистки;

3. снизить затраты в операции по удалению твердых частиц, путем увеличения общей площади фильтрующих элементов и, как следствие, увеличения периода полного их засорения и уменьшения числа операций по удалению твердых частиц из УГО;

4. уменьшить площадь помещения, необходимую для размещения установок очистки, а также сократить расход тепловой энергии на отопление указанной отчуждаемой площади.

### 1.1 Основные понятия и схемы очистки природного газа от механических примесей

Весь процесс добычи и подготовки газа к транспортировке можно описать схемой. Для удобства изложения любую схему можно условно разделить на модули, которые состоят из одной или нескольких единиц оборудования, выполняющего определенные функции. На схеме 5, показаны почти все направления переработки природных газов. Они охватывают практически все приемлемые схемы, хотя на данный момент в схеме присутствуют не все элементы.



Рис.4. Схема переработки природного газа

#### Характеристика исходного сырья

Газ метановый с содержанием влаги до  $2,5 \text{ г/м}^3$ , сероводород отсутствует.

Природный газ, поступающий на установку комплексной подготовки газа, представляет собой пластовую смесь, в состав которой входят углеводороды, капельная влага (конденсационная и пластовая) и мехпримеси.

Компонентный состав газа в соответствии с проектом разработки, % объемные:

CH <sub>4</sub>	-	97.8...99.0;	N <sub>2</sub>	-	0.7...1.7;
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-	0.0...0.15;	He	-	0.01...0.02;
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-	до 0.15;	Ar	-	0.01...0.03;
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-	следы;	H <sub>2</sub>	-	0.002...0.04;
CO <sub>2</sub>	-	0.2...0.3;			

Состав мехпримесей (% масс.):

- окислы железа - 25...30;
- кремнезем - 60...70;
- глинозем - 5...10;

Модуль “переработка и очистка газа”:

Когда газ предназначен победителю, то ограничением являются следующие характеристики:

- Влагосодержание (иногда выражено как точка росы);
- Содержание серы (не более 5,7г/1000м<sup>3</sup> газа);
- Содержание твердых примесей;
- Максимальная точка росы по углеводородам;
- Удельная теплота сгорания;
- Наличие жидкости;
- Влагосодержание газа на выходе;

Также необходимо учитывать: виды сернистых соединений, т.к. в зависимости от типа соединения схема переработки газа различная. При определении влагосодержания газа следует учитывать результаты его анализа, компонентный состав.

Извлечение паров углеводородов и жидкости из газа можно делать с

использованием отдельной установки. Например, адсорбционные установки, работающие на силикогеле, молекулярных ситах и активированном угле, позволяют проводить эти операции в одном аппарате. Холодильные установки (автономные или в сочетании с адсорбцией) так же можно применять для выполнения этих операций. Если извлечение какого-то компонента осуществляется с помощью жидкости, то необходимо строго следить за количеством тепла, подаваемого на установку. Потому что это может отразиться на максимальной величине извлечения компонента.

Модуль “месторождение (пласт)”:

Проект месторождения предназначен для следующих целей:

- определение запасов;
- получение данных для будущего планирования (составление проекта разбуривания, поставка оборудования, способы получения продукции и т. д.);
- получение справочных данных для эксплуатации системы.

Основные проблемы в достижении этих целей будут определяться характеристикой продукции пласта, доступностью источников энергии и физическим состоянием пласта.

“Провести анализ состава продукции пласта непосредственно в пласте невозможно. Посредством замера давления и скорости потока можно определить плотность ее в стволе скважины. Однако в скважине содержится только то, что поступает в нее. Значит любой состав (рассчитанный или измеренный) по своей природе является случайным (вероятностным). Полученные данные — основа для определения частоты распределения и чувствительности анализов. Последующие модули рассчитываются и работают в зависимости от этих данных. Рассчитанная (а потому и оптимальная) гибкость будет компенсировать принятые коэффициенты «надежности». Последующий анализ проб, выполняемый в ходе эксплуатации пласта, позволит усовершенствовать систему с целью получения максимальной прибыли.”

Модуль “извлечение конденсирующихся углеводородов”:

В этом модуле имеется несколько альтернатив, таких как:

- Общее сжижение;
- Частичное сжижение;

При частичном сжижении полученные жидкости могут быть поставлены к потребителю в сыром или полусыром виде.

При сжижении природного газа (полном или частичном) всегда контролируются: давление, температура и состав потоков с целью получения необходимого количества жидкости определенного состава. Температура контролируется путем отвода теплоты, а концентрация – за счет применения адсорбирующей поверхности или контакта газового потока с соответствующим количеством жидкости определенного типа, которая способствует конденсации углеводородов.

При адсорбции сжижаемые компоненты поглощаются адсорбентом и после насыщения десорбируются из него при регенерации. Благодаря этому увеличивается концентрация компонентов в газе и повышается эффективность конденсации. Поэтому адсорбция является процессом, с помощью которого контролируется концентрация вещества в потоке, поступающем на сжижение. Дальнейшее повышение эффективности процесса конденсации может быть достигнуто за счет охлаждения.

“В процессе адсорбционного извлечения углеводородов из газа, который значительно зависит от температуры, в качестве поглотителя применяется углеводородная фракция с относительной молекулярной массой 100—180. Эффективность конденсации в этом процессе зависит от давления и температуры контакта, соотношения газа и абсорбента, числа ступеней контакта и фазового поведения компонентов. Для увеличения эффективности извлечения конденсирующихся углеводородов абсорбция может применяться совместно с охлаждением.”

Извлечение углеводородов из газа способом охлаждения состоит в увеличении конденсации за счет снижения температуры потока. Для этого применяют несколько способов охлаждения: компрессионное, абсорбционное, расширение газа в турбинах, дросселирование газа в штуцерах. Каждый из этих

методов можно рассматривать как средство модуля извлечения жидкости отдельно или в сочетании с одним из рассмотренных процессов извлечения.

Для подготовки газа к дальнему транспорту от газовых и газоконденсатных промыслов применяются физико-химические методы, основанные на использовании низкотемпературной сепарации газа и сорбционных процессов, при которых из газа поглощаются углеводороды жидкими и твердыми телами. Этими методами одновременно предусматривается и углубленная осушка газа, и выделение из него углеводородов.

В газовой промышленности применяются следующие методы:

- 1) низкотемпературная сепарация с получением холода за счет пластовой энергии или холодильных установок с вводом ингибитора гидратообразования;
- 2) масляно-абсорбционные, обычные и с охлаждением абсорбента;
- 3) адсорбционные в вариантах периодической и непрерывной адсорбции;
- 4) низкотемпературная конденсация;
- 5) с помощью молекулярных сит и диффузионного разделения через пористые мембраны.

Технологический процесс низкотемпературной сепарации — непрерывный, предназначается для выделения при низких температурах из потока газа конденсата и влаги с поддержанием в сепараторе давления, близкого к давлению максимальной конденсации.

На установках низкотемпературной сепарации низкие температуры получаются путем использования естественного перепада давления — дросселирования — и адиабатического расширения газа с совершением внешней работы, а также за счет искусственного охлаждения газа.

При обеспечении снижения точки росы по воде и углеводородам установки низкотемпературной сепарации с применением в качестве ингибитора гидратообразования гликолей и их регенерацией на установках

могут рекомендоваться для подготовки газа к дальнейшему транспорту для большинства газоконденсатных месторождений Советского Союза.

Метод масляной абсорбции позволяет значительно увеличить выход из газа этано-пропано-бутановых и тяжелых фракций углеводородов, осуществить глубокую осушку его от влаги и является кардинальным решением качественной подготовки газа к дальнейшему транспорту. В зависимости от количественного содержания в газе углеводородов  $C_2—C_6$  и их максимального извлечения от потенциала технологический процесс может протекать при температуре абсорбции в широком диапазоне  $310—210^\circ K$ . С понижением температуры, повышается абсорбционная способность масла, и этим достигается увеличение извлечения из газа потенциала этано-пропано-бутановых фракций. Адсорбционные установки предназначены для глубокой осушки и полного извлечения пентановых и более кипящих фракций углеводородов из природного газа, содержащего незначительное количество этих фракций (переработка тощих газов).

По технологическому процессу адсорбционные установки могут быть:

- а) непрерывной адсорбции;
- б) периодической адсорбции с очень длительным циклом адсорбции;
- в) короткоциклового адсорбции.

Эффективность технологического адсорбционного процесса зависит от свойств и природы адсорбционного вещества и температуры. Установки короткоциклового адсорбции могут применяться для выделения из газа углеводородов и глубокой осушки его после процесса низкотемпературной сепарации и в качестве самостоятельного технологического процесса.

Технологический процесс низкотемпературной конденсации предназначается для извлечения из газа, содержащего значительное количество углеводородов  $C_2—C_6$ , свыше  $600 \text{ г/м}^3$ , извлечения гелия и при сжижении метана. В этом процессе температура конденсации колеблется от  $228$  до  $188^\circ K$ , и во избежание образования гидратов в аппаратах производится предварительная осушка газа твердыми или жидкими сорбентами. Новые

методы извлечения углеводородов из природного газа и выделения влаги с помощью молекулярных сит (искусственные цеолиты) могут широко применяться в газовой промышленности как для осушки от влаги и удаления  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$ , так и для выделения тяжелых углеводородов. При помощи цеолитов достигается высокая степень осушки природного газа до  $233\text{—}218^\circ\text{K}$ . Выбор метода подготовки газа к дальнему транспорту и технологической схемы зависит от:

а) фракционного состава исходного газа (содержание углеводородов  $\text{C}_3\text{—C}_3$  плюс высшие, наличия влаги, инертных газов, сероводорода и других компонентов);

б) требований потребителей, использующих газы, к составу и качеству газа;

в) географического положения и климатических условий района добычи газа и района транспортирования газа;

г) технико-экономического обоснования эффективности применяемого метода подготовки газа по сравнению с другими.

При подготовке к транспорту газа чисто газовых месторождений основное внимание уделяется глубине его осушки. Выбор метода осушки определяется параметрами газа на устье скважины (давление, температура) и географическим положением месторождения. В зависимости от этих условий в технологических схемах предусматривается снижение точки росы паров по воде с помощью низкотемпературной сепарации сорбционных процессов или же последовательно тем и другим методами.

Технологические схемы подготовки газа к транспорту могут быть различными в зависимости от газовых месторождений:

- 1) С высоким давлением и низкой температурой на устье скважины;
- 2) С низким давлением и сравнительно высокой температурой на устье скважины;
- 3) Северные месторождения.

Для газовых месторождений первого типа газ из скважины по шлейфам

поступает на сборный пункт при устьевом давлении с температурой выше температуры гидратообразования. Перед поступлением в сепаратор газ дросселируется, температура его снижается и для предотвращения образования гидратов перед штуцером вводится ингибитор гидратообразования. Регенерация ингибитора гидратообразования производится на специальной установке сборного пункта, которая рассчитывается на максимальное выделение из газа влаги. Если по условиям транспортировки газа необходимо при осушке иметь более низкую точку росы пара по воде, чем получаемую после осушки жидкими поглотителями предусматривается дополнительная осушка газа на адсорбционной установке с применением силикогеля в качестве адсорбента.

На газовых месторождениях с невысокой производительностью сборных пунктов ингибитор гидратообразования регенерируется на одном централизованном пункте.

Технологический процесс подготовки к транспорту газа для газовых месторождений второй категории несложный. Обычно в таких месторождениях при дросселировании газа на устье скважины или непосредственно перед поступлением в сепаратор температура его бывает выше температуры гидратообразования, и не снижается до ГРС. Это позволяет весь газ без переработки из групповых сборных пунктов направлять на ГРС, где осуществлять его осушку жидкими поглотителями на одном централизованном пункте для транспортирования по магистральному газопроводу.

Централизованная осушка газа жидкими поглотителями применяется на газовых месторождениях с невысоким пластовым давлением и сравнительно высокими температурами на устье скважины, на головных сооружениях магистральных газопроводов и перед компрессорными станциями.

Для подготовки к транспорту газа уз месторождений северных районов необходимо осуществлять более глубокую осушку газа с получением точки росы по парам воды 213-218 °К. Для получения такой степени осушки в технологической схеме должно быть предусмотрено следующее:

1) Прокладка шлейфов на поверхности земли для охлаждения по пути движения за счет теплоотдачи с окружающей средой.

2) Индивидуальный ввод ингибитора гидратообразования – метанола в каждую скважину во избежание образования гидратов в подъемных трубах и шлейфе.

3) Ввод в поток газа метанола перед дросселирующим штуцером.

4) Адсорбционная установка с двухступенчатой осушкой твердыми сорбентами – силикогелем и цеолитами.

Подготовка к транспорту газа газоконденсатных месторождений характеризуется высоким начальным пластовым давлением. Такое высокое давление пласта позволяет на большинстве месторождений эффективно использовать энергию сжатого газа в процессе НТС с целью извлечения наиболее полного газового конденсата и глубокой осушки.

## 1.2 Аппараты сухой инерционной очистки газов

Технологические процессы очистки газов сухими [49] пылеуловителями основываются на физических и химических свойствах загрязнителей и использовании основных физических закономерностей, в результате которых происходит пылеулавливания. Совершенствование технологических процессов и разработка новых малой и безотходных технологий, позволяющих улавливать и утилизировать газовые отходы, базируется на использовании одного либо нескольких аппаратов осаждения механических примесей в газах частиц. Основными механизмами осаждения механических частиц является действие сил гравитации, инерции, диффузии, центробежных.

Осаждение под действием сил гравитации обусловлено вертикальным перемещением частиц в результате действия силы тяжести при перемещении их через газоочистительный аппарат.

Осаждение под действием центробежной силы происходит при криволинейном движении аэродинамического потока, когда возникают центробежные силы, под действием которых частицы пыли отбрасываются на поверхность аппарата.

Инерционное осаждение происходит в случае, когда масса частицы или скорость движения настолько незначительны, что она уже не может двигаться вместе с газом по линии тока, охватывающий препятствие. Пытаясь по инерции продолжать свое движение, частицы пыли сталкиваются с препятствием и осаждаются на ней.

Диффузионное осаждение происходит вследствие того, что мелкие частицы пыли испытывают непрерывного взаимодействия с частицами газов, которые находятся в движении. В результате этого взаимодействия происходит осаждение частиц на поверхности обтекаемых тел или стенок пылеуловителя.

Кроме основных механизмов осаждения взвешенных частиц, в технологических процессах очистки газовых выбросов учитывают воздействие электрического и магнитных полей. В технологическом оборудовании для пылеулавливания в большинстве случаев одновременно принимают участие в

очистке газового потока несколько физических процессов. Но, часто, только один из них является доминирующим при осаждении частиц определенного типа. При проектировании технологических процессов и конструировании газоочистного оборудования необходимо, в первую очередь, определить тип вещества, удаление из газового потока, ее объем и параметры. Основными параметрами являются скорость газового потока, температура и состав газов, природа компонентов, извлекаемых из газов, и необходимую степень очистки.

### 1.3 Инерционные пылеуловители

Инерционные пылеуловители применяют для грубой очистки сухих газовых выбросов от частиц пыли размером от 30 до 100 мкм.

Принцип действия инерционных аппаратов основывается на использовании инерционных сил и дополнительного момента движения вниз. Если в аппарате по направлению движения газа установить перегородку, то газовый поток покидает ее, а твердые частицы по инерции сохраняют прежнее направление движения. Наталкиваясь на перегородку, они теряют скорость и выпадают из течения. Эффективность пылеулавливания увеличивается, если частичке предоставить дополнительный момент движения, вектор которого направлен вниз и совпадает с вектором гравитационных сил.

Преимуществом инерционных пылеуловителей являются небольшие габариты, что обеспечивают скорость движения газов 10...15 м/сек. Достаточно высокое гидравлическое сопротивление 200...300 Па обеспечивает степень уловления до 65-80% частиц размерами менее 25...30 мкм.

По конструкции простейшие инерционные пылеуловители бывают (рис. 5) с вертикальной перегородкой (а), с центральной трубой (б), с боковым штуцером (в) и с горизонтальными элементами (г).

Жалюзийные пылеуловители используются для разделения газового потока на очищенный и обогащенный пылью газ. В жалюзийных пылеуловителях пыль выделяется из газового потока под действием инерционных сил при изменении направления движения газового потока с

помощью жалюзийных пластин или колец. Скорость движения газов достигает 10...15 м/сек. Конструктивная схема жалюзийного пылеуловителя с пластинами приведена на рис. 6.

Жалюзийный пылеуловитель делит газовый поток на две части.

Основной поток  $Q_1$  в значительной степени очищен от пыли

$$Q_1 = (0,8...0,9)Q \quad (1.1)$$

где  $Q$  – суммарный газовый поток очищается.

А второй поток, насыщенный пылью, идет на дальнейшую очистку в циклон

$$Q_2 = (0,1...0,2)Q \quad (1.2)$$

Эффективность очистки составляет 80% и более для частиц размером 20 мкм.

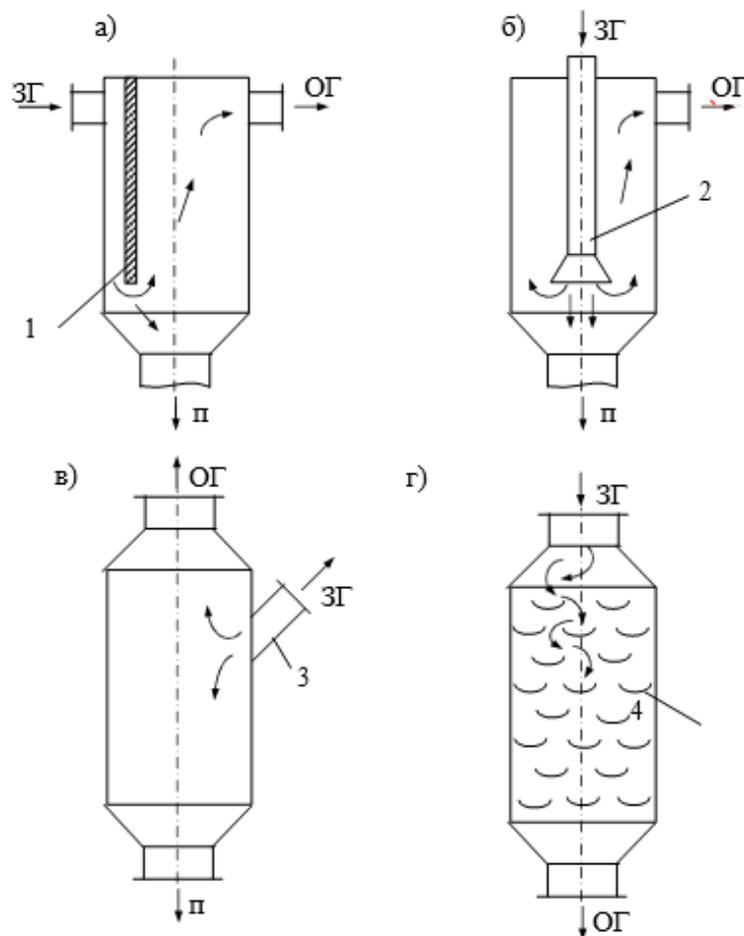


Рисунок 5 – Конструкции инерционных пылеуловителей:

1 – перегородка; 2 – центральная труба; 3 – боковой штуцер; 4 – горизонтальные элементы

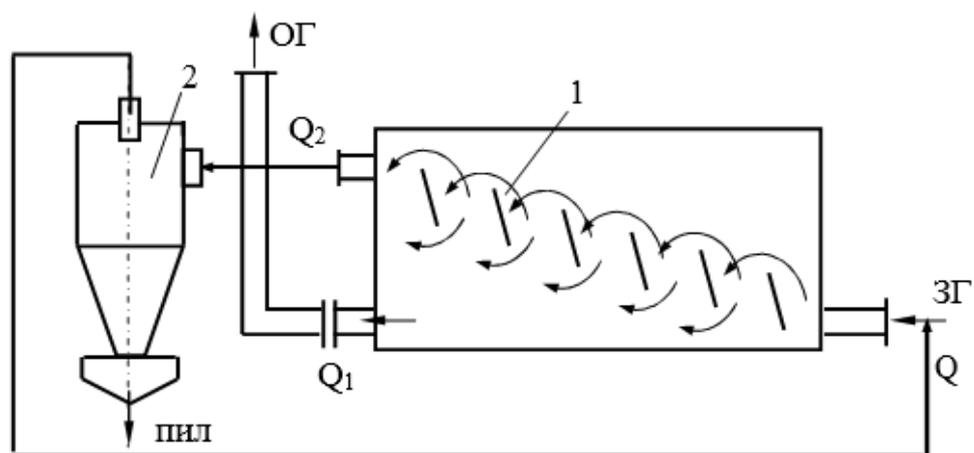


Рисунок 6 – Конструктивная схема жалюзийного пылеуловителя с пластинами: 1 – жалюзийные пластины; 2 – циклон

Для изменения направления движения газового потока вместо пластин используются также кольца (рис. 7). Аппараты выполняются в виде конусов, составленные из отдельных колец, которые находятся на определенном расстоянии друг от друга. Высота конусного кольца 10...20 мм, а расстояние между элементами 2...20 мм.

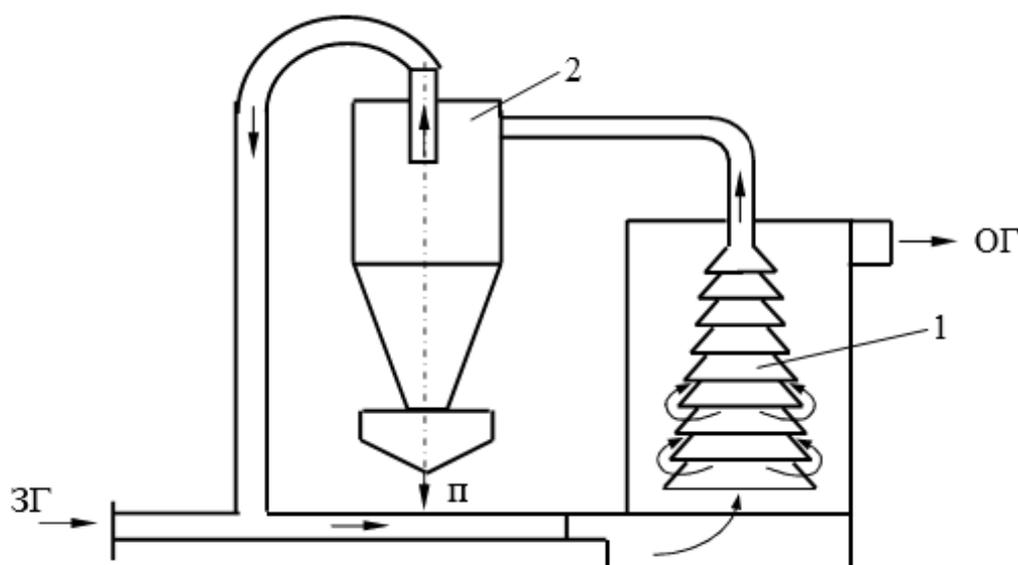


Рисунок 7 – Конструктивная схема жалюзийного пылеуловителя с кольцами: 1 – кольца, 2 – циклон.

Для очистки значительных объемов газов из отдельных аппаратов составляют батарейные инерционные пылеуловители (БИП).

В жалюзийных пылеуловителях гидравлическое сопротивление 400...500

Па при концентрации пыли 2 г/см<sup>3</sup>.

Характеристика фракционного степени очистки газов от пыли с концентрацией 2 г/см<sup>3</sup> в жалюзийных пылеуловителях приведена в табл. 1.

Таблица 1.1. Зависимость степени уловления от диаметра частиц пыли

Диаметр частиц, мкм	5	10	15	20	25	30	40	50
Степень уловления, %	25	47	63	75	86	90	92	93

Положительными качествами жалюзийных пылеуловителей является малое гидравлическое сопротивление и сравнительно небольшие размеры. Недостатком является быстрый износ пластин или колец особенно при высокой концентрации фракций пыли со значительным диаметром частиц. [48]

## 1.4 Циклоны.

### 1.4.1 Общая характеристика конструкций циклонов

Среди средств сухой инерционной очистки газов от пыли и механических примесей наиболее распространены циклоны, которые применяются для выделения из газового потока частиц сравнительно большого размера. В зависимости от качеств пыли и ее дисперсного состава, и требований к очистке газа, циклоны применяются как аппараты первой степени очистки или соединенные с другими пылеулавливающими аппаратами. Они эффективно улавливают из газа частицы пыли диаметром 5 мкм и больше. Допустимая начальная концентрация пыли в пылегазовом потоке, очистка в циклонах зависит от качеств загрязненных газов, конструкции и размеров циклона. В среднем она не должна превышать  $400 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>.

Достоинством циклонов является:

- отсутствие движущихся частей в аппарате;
- надежное функционирование при температурах газов почти до 500 °С;
- возможность улавливания различных материалов при защите специальным покрытием внутренней поверхности;
- простота изготовления конструкции;
- независимость работы аппарата от давления газа;

- независимость фракционной эффективности очистки от роста запыленности газов;

- высокая производительность при сравнительно низкой стоимости.

Недостатком является то, что значительное гидравлическое сопротивление 1250...1500 Па высоко - эффективных циклонов приводит к плохому улавливание частиц размером менее 5 мкм.

Классификация циклонов по конструктивным признакам приведена на рис.8.

В различных отраслях промышленности в зависимости от условий производства и требований очистки используют типы циклонов: ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У (“укороченный”), ЦН-24 конструкции НДЮ газа. Цифра означает угол развертки между тангенциально присоединенным входным патрубком и цилиндрической частью циклона. При опасности налипания слоя пыли в корпусе и значительной абразивной пыли используются спирально-конические циклоны СК-ЦН-34, спирально конические циклоны СДК-ЦН-33. Цифры 34 и 33 характеризующие отношение диаметров выхлопной трубы к цилиндрической части корпуса.

#### 1.4.2 Прямоточные циклоны.

Особенностью этих циклонов является прямоточный, то есть без изменения направления, движение газового потока. Вход и выход газов в таких аппаратах происходит с противоположных концов. Преимуществом прямоточных циклонов является малое гидравлическое сопротивление что повышает их защиту истиранию. Недостатком является малая эффективность очистки. Поэтому их используют как первую ступень для грубой очистки газов от крупных частиц пыли.

Закручивание газа в прямоточных циклонах происходит как за счет тангенциального ввода запыленного газа, так и за счет установки направляющих аппаратов в виде розеток. Наибольшая эффективность работы прямоточных циклонов при очистке газов с крупно дисперсной пылью и может

быть увеличена путем подбора оптимального отношения размеров отдельных узлов и деталей. Если содержимое мелко дисперсной фазы в газовом потоке незначительный, то прямоточные циклоны возможно использовать в качестве самостоятельных пылеуловителей.

Скорость газового потока в аппарате 5...6 м/с.

Прямоточный циклон конструкции ЦКТИ приведена на рис.13.

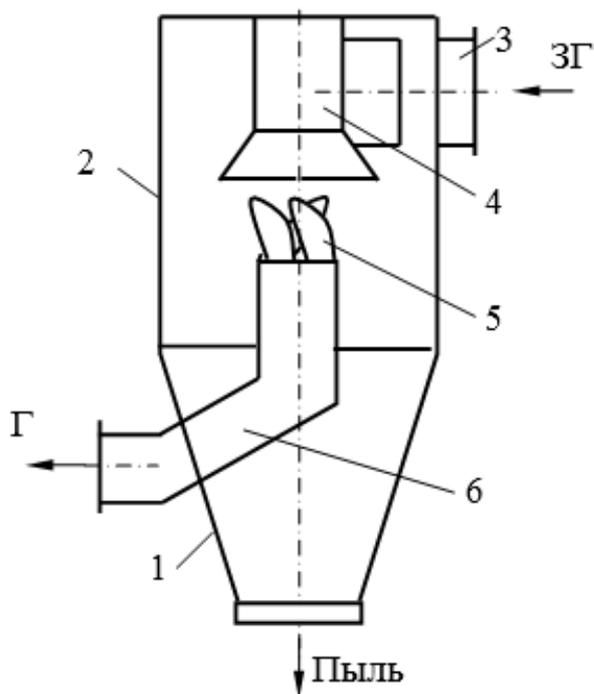


Рисунок 8 – Конструктивная схема прямоточного циклона типа ЦКТИ:

1 – конусная часть; 2 – цилиндрическая часть; 3 – тангенциальный штуцер; 4 – вставка, вокруг которой газ выполняет вращения; 5 – раскрутка очищенного газа; 6 – газоход очищенного газа.

Предварительная очистка газов в прямоточном циклоне конструкции ЦКТИ происходит таким образом. Запыленный газ подводится в цилиндрическую часть корпуса аппарата 2. тангенциальным штуцером 3. Благодаря тангенциальному штуцеру газ получает вращательное движение вокруг вставки 4. Удалены из пылегазового потока частицы собираются в конусной части аппарата 1 откуда они удаляются наружи. Очищенный газ проходит раскрутку 5 и выводится из аппарата газоходом 6.

Конструктивная схема прямоточного циклона типа НВГК с тангенциальным патрубком для подвода загрязненного газа и с конусным

корпусом ( $\alpha = 20^\circ$ ) приведена на рис. 10. Полученные отношения геометрических размеров аппарата следующие: диаметры выхлопной трубы  $D_{ВЫХ} = 1,3 d$  ( $d$  – диаметр тангенциального патрубка), а отношение высот  $h/H_K = 0,7$ . Эффективность очищения при двух последовательно расположенных циклонах составляет: после первой ступени очистки от частиц диаметром 60 мкм – 95%, а после второй ступени – от частиц диаметром 20 мкм – 98%.

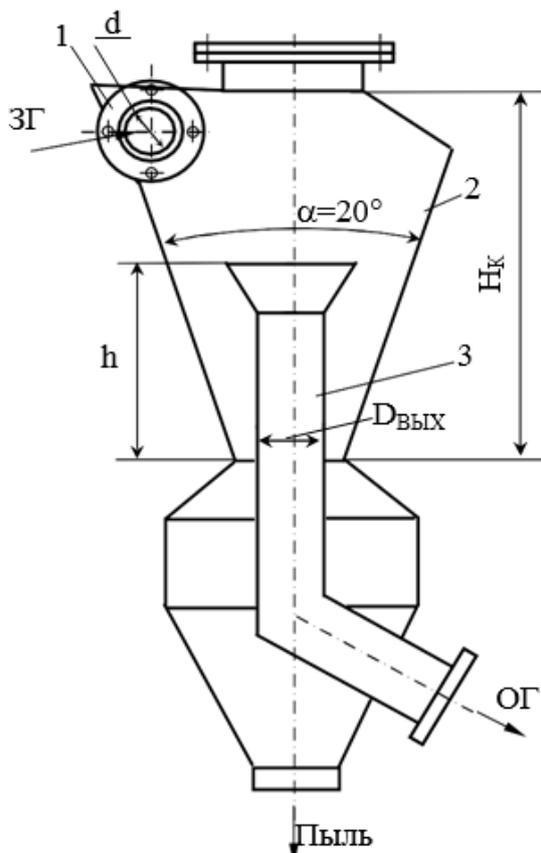


Рисунок 9– Конструктивная схема прямоточного циклона типа НВГК: 1 – тангенциальный патрубок; 2 – конусный корпус; 3 – выхлопная труба очищенного газа.

#### 1.4.3 Противоточные циклоны

Разделение примесей в газовом потоке производится по высоте противоточного циклона. В настоящее время разработано и используется большое количество конструктивных особенностей противоточных циклонных аппаратов.

В циклонах НИИОГАЗ (ЦН) [51] газовый поток с механическими примесями поступает в камеру циклона со скоростью 15-25 м/с, через тангенциально расположенный отвод.

Корреляция интенсивности корреляционных течений от угла наклона входного патрубка к образующей корпуса циклона, представлена в работе [52]. Длина камеры в относительных величинах равняется 1,1. При уменьшении угла ввода газового потока в камеру происходит увеличение мощности периферийного опускного потока, что способствует достижению большего количества газа к глухому торцу. Минимальная циркуляция достигается при угле в  $78^\circ$ , дальнейшее уменьшение угла приводит к уменьшению расхода газового потока вблизи глухого торца. Крутка и аэродинамическое совершенство подвергается незначительным изменениям при уменьшении угла до  $65^\circ$ .

Распространение кольцевой струи по стенке вниз подвергается постепенному размыванию из-за радиального оттока жидкости к центру [53]. У завихрителя аксиальная скорость больше в два раза на середине камеры.

Авторами работы [54] проведен ряд экспериментальных мероприятий и анализ полученных данных, при вихревом течении в цилиндрическом противоточном циклоне. Распространение дыма практически не различалось при изменении угла от  $10^\circ$  до  $30^\circ$  к горизонту. Увеличение длины камеры до 12 диаметров, также не вызвало существенных изменений в распространении дыма. При дальнейшем увеличении длины камеры замечен режим периодического течения. В таком течении центральный вихрь не касался центра дна, а касался стенки циклона. Точка касания изменялась со временем.

Аэродинамическое изучение батарейных циклонов проведены авторами работы [55]. Степень отводимых с механическими примесями газов влияет на сопротивление циклона. Характерная особенность противоточного циклона заключается в формировании около выходного патрубка зон с большой степенью циркуляции.

В [59,60] разработаны циклоны с меньшими энергетическими затратами

на сопротивление циклона. В данных конструкциях радиальная скорость потока неравномерна. Разделительная поверхность является не постоянной, из-за того, что вихрь движется прецессионно. Понижение эффективности происходит за счет образования обратных токов. В погружной трубе потеря энергии достигает до 90% от всей потери затраченной на преодоление циклона. В работе [61] представлена корреляция коэффициента сопротивления циклона при изменении относительной длины выхлопного отвода циклона. Оптимальное значение относительной длины выхлопного отвода лежит в интервале значений от 3 до 4.

В работе [62] даны методические рекомендации для расчёта закручивающего устройства, приведена система уравнений для расчета осесимметричного течения учитывающая потери энергии и моментов импульсов, которая дает оценку потерь энергии при изменении значения степени закручивания газового потока. Представлены принципы энергетических потерь при закручивании газового потока. В [63] авторами сделан вывод, о том, что при увеличении числа, которое обратно пропорционально числу Россби, число крутки возрастает. Однако, при увеличении данного числа до значения 2, скорость возрастания снижается, протекающая с большими энергопотерями, вследствие того, что отсутствуют эффективные раскручивающие устройства диффузорного типа, которые преобразуют скоростной напор в давление.

В работе [64] исследовано стационарное турбулентное движения газового потока, содержащего включения, по закрученной траектории при различных окружных скоростях. Принималось равенство коэффициентов турбулентного перемешивания и диффузии, газовой фазы и частиц соответственно. Турбулентный процесс считался изотропным. Тангенциальная скорость частиц, считается равной скорости газового потока в осредненном движении.

В работе [65] приведены эффективности циклонов с различными конструкциями корпуса, а именно: сужающийся конус; расширяющийся конус; цилиндр. В данных аппаратах применялись равные по размерам следующие

конструктивные элементы: входной и выходной патрубок; пылеприемник. Циклонный аппарат корпус которого представлял вид обратного конуса имел сопротивление меньше на 20%, чем циклонный аппарат в виде сужающегося конуса. В коническом циклонном аппарате максимум эффективности достигался 97.5% при значении скорости входа газового потока 13 м/с, дальнейшее увеличение скорости приводило к уменьшению эффективности, так, при скорости входа газового потока 18 м/с значение эффективности равнялось 96%. При работе циклона, с корпусом в виде обратного конуса значение эффективности при ранее указанных скоростях равнялось соответственно 97% и 98%. Значения эффективности из рассмотренных циклонов минимальны у циклона с цилиндрическим видом корпуса. По окончании работы, дана рекомендация к эксплуатации циклона с видом корпуса: расширяющийся конус.

Авторами работы [66] проведен комплекс исследований на испытательном стенде, для определения максимальной эффективности циклона при различных типах конструктивного их выполнения. Так, подвергались исследованию 4 типа конструктивного выполнения циклонного аппарата, а именно: осевой подвод потока использовался для циклонов с коническим и плоским дном; тангенциальный подвод потока использовался для циклонов с коническим и плоским дном. Наибольшая эффективность достигается при использовании тангенциального подвода газового потока в циклонах с плоским дном. Эффективность круто снижается при значении продувки меньше 1%.

Сравнение эффективности циклонов УЦ-500, ЦОЛ-3, ЦН-15 приведены в работе [67]. Для определения эффективности применялась пыль с медианным размером 12 мкм и дисперсией 2,5. Циклон ЦН-15 имеет наибольший показатель обеспыливаемости, относительно других сравниваемых циклонов. Но фракционная эффективность у циклона ЦН-15 наименьшая. Это связано с коагуляционными и взаимодействующими процессами между частиц.

Зависимость сепарационных характеристик циклонных аппаратов от скорости ввода газового потока представлена в работе [68]. Дана рекомендация

использовать скорость ввода газового потока в интервале значений от 12 м/с до 18 м/с. Процесс жгутообразования влияет на эффективность циклона. При увеличении скорости ввода газового потока происходит размытие жгутов, что является причиной снижения эффективности процесса. Н.А. Фукс объясняет данную закономерность путем влияния турбулентности и возрастания несущей способности газового потока. Такие же процессы наблюдаются в газожидкостных циклонах. При увеличении значения скорости потока газа больше 20 м/с, наблюдался вторичный унос.

Моделирование протекания процессов в циклоне рассмотрено в работе [69]. В основе для данной модели лежит то, что сумма всех сил, действующих на частицу равна нулю. Принимаемые методы моделирования не учитывают поверхностные свойства частиц. Эти модели могут применяться в определенном интервале скоростей, от 5 м/с до 20 м/с, в котором примеси газового потока не создают отложения на стенках циклона.

Осаждение частиц на стенки корпуса происходит под действием броуновской диффузии и седиментации. При размере частиц более 10 мкм наблюдается седиментация, при размерах частиц менее 0,5 мкм наблюдается броуновская диффузия. Работы Медникова [70] дают объяснение процесса осаждения в интервале размеров от 0,5 мкм до 10 мкм. Основой осаждения включений газового потока является пульсация составляющих осредненной его скорости. Данное осаждение, при турбулентном течении больше на несколько порядков, чем процесс диффузионного осаждения. Сила инерции в этом случае, больше чем сила тяжести в тысячу раз. На стенке корпуса скорость осаждения не равна нулю в связи с тем, что ламинарный подслой потока перекрывается инерционным движением. В связи с тем, что скорость крупных частиц больше, чем скорость несущего потока, то данное движение протекает с импульсным взаимодействием включений газового потока с корпусом аппарата [71]. Аутогезионные свойства частиц влияют на процесс их осаждения в циклонном аппарате.

#### 1.4.4 Групповые и батарейные циклоны

Увеличение диаметра циклона при постоянной тангенциальной скорости газа, поступающего, является причиной уменьшения центробежной силы и снижению эффективности очистки. Единичные циклоны даже больших размеров имеют сравнительно невысокую производительность и трудности при их установке.

Групповые установки [38] из нескольких циклонов создают при очистке промышленных газов, объемы которых десятки и тысячи кубометров в час. Такие установки имеют общий коллектор для подачи запыленного и отвода очищенного газа, а также один бункер для сбора пыли. Размещают групповые циклоны двухрядным способом по 2...8 шт или вокруг вертикального входного патрубка по кругу по 10...14 шт.

Размещение групповых циклонов двухрядным способом представлена на рис. 11.

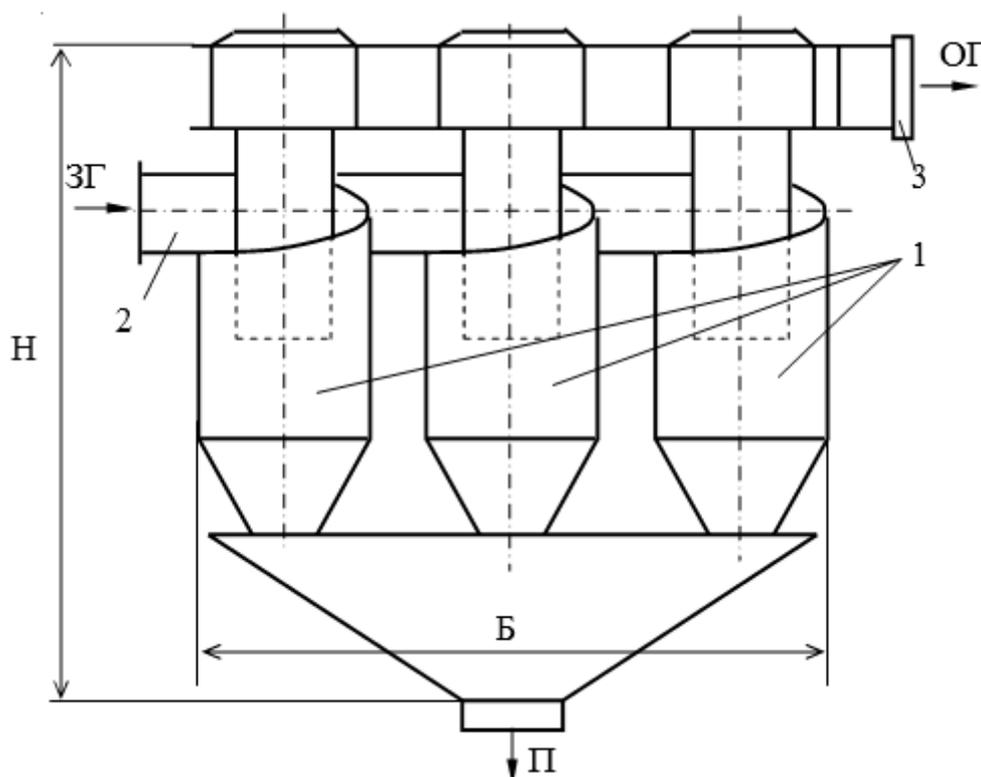


Рисунок 10 – Конструктивная схема групповых циклонов, которые размещены двухрядным способом: 1 - отдельные циклоны, 2 -коллектор подачи запыленного газа с улитками на каждом циклоне, 3 -коллектор, отводящий очищенный газ.

Групповые циклоны конструкции ЦН-11 имеют диаметры  $D$ , мм: 400, 500, 600, 800, а высота соответственно 2320, 2900, 3654, 4640. Продуктивность 5000...40 000 м<sup>3</sup>/час.

Размещение групповых циклонов по кругу представлены на рис. 12.

Необходимое число циклонов в группе

$$n = \frac{Q}{g}, \quad (1.3)$$

де  $Q$  - объемный расход очищающего газа, м<sup>3</sup>/с;

$g$  - Расход через один элемент:

$$g = 0,785 V_{\Gamma} D^2; \quad (1.4)$$

$V_{\Gamma}$  – скорость газа, м/сек.

Производительность и габаритные размеры установки групповых циклонных конструкции приведены в табл. 1.2.

Степень очистки в групповых циклонах ниже, чем в единичном циклоне. Это обусловлено тем, что в единичном циклоне вихревой поток, движущийся по спирали вниз, после того как дойдет до однополярного бункера, сохраняя вращательное движение, резко меняет направление своего движения в центральной выхлопной трубы. В групповых циклонах вследствие нарушения герметичности общего бункера изменяется гидравлический режим, что является причиной уменьшения степени очистки запыленных газов.

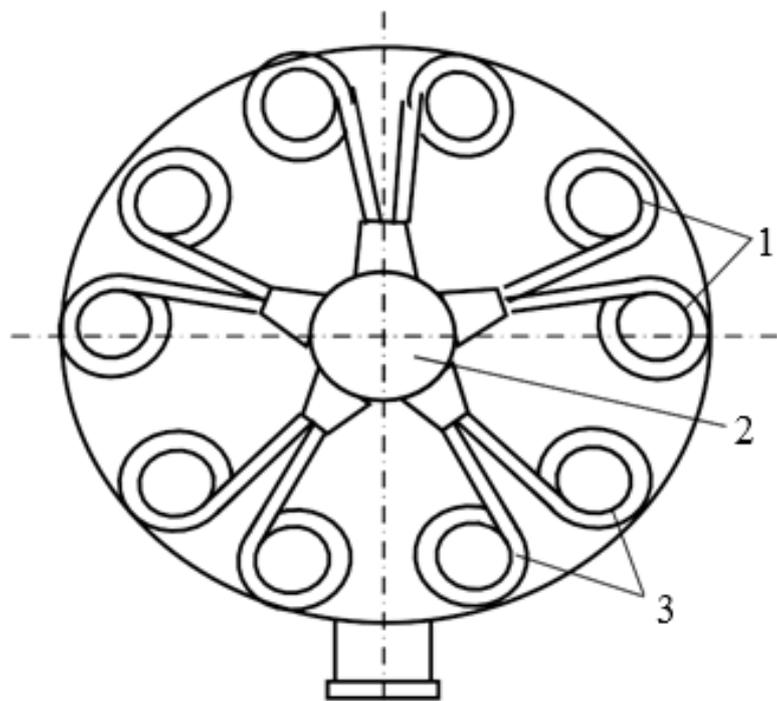


Рисунок 11 – Конструктивная схема групповых циклонов, которые размещены по кругу: 1 - отдельные циклоны; 2 – коллектор; 3 – улитки, которые соединены с отдельными циклонами.

Таблица 1.2 – Технические характеристики групповых циклонов типа ЦН-

15

Число циклонов в группе	Размещение циклонов	Диаметр, мм		
		400	600	800
Производительность, м <sup>3</sup> /ч				
1	Прямоугольное	1450...1690	3262...3810	5 800...6 780
2		2800...3380	6524...7620	11 600...13 520
3		4250...5073	9786...11430	17 400...20 280
4		5800...6764	13048...15240	23 200...27 040
6	Круговое	8000...11 046	19572...22810	34 800...40 560
8		-	-	46 400...54 080
10		14500...17400	32 620...33 144	58 000...67 800
12		20 292	45 720	81 200
14		23 640	46 670	90 200
16		28 340	63 340	94 640

Батарейные циклоны используются в случае очистки значительных объемов газа. Преимущества перед групповыми, батарейные циклон состоит в том, что они при одинаковой производительности имеют меньшие размеры, обеспечивают большую степень очистки, имеют меньшее гидравлическое сопротивление, работают в значительном диапазоне запылённости (до 100

г/м<sup>3</sup>).

Их недостатком является сложность изготовления и значительная металлоемкость аппаратов. Кроме того, батарейные циклоны эффективно работают только при очистке сухих газов и пыли, которая не слипается.

Высокая степень очистки газов до 90...95% достигается за счет установки в циклонах элементов малого диаметра (циклонов). Центробежная сила в таких элементах увеличивается, одновременно повышается эффективность очистки. Батарейный циклон имеет от нескольких десятков до нескольких сотен параллельно включенных элементов, которые имеют общие коллекторы для подвода газа, а также общий бункер для сбора пыли. В состав батарейного циклона входят элементы диаметром 100, 150 и 200 мм. Вращательное движение газа в этих элементах выполняется за счет тангенциального подвода, а также путем аксиальной подачи с направляющими.

Батарейный циклон конструкции ПС с тангенциальным подводом газа к элементам изображены на рис.12.

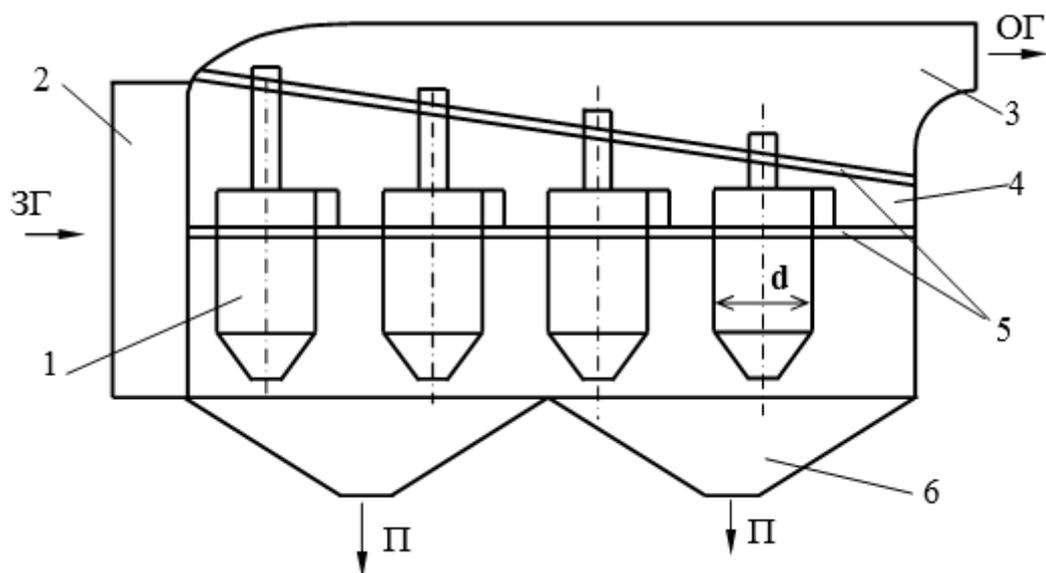


Рисунок 12 – Батарейный циклон типа ПС:

- 1 – элементы с тангенциальными патрубками; 2 – входной патрубок;
- 3 – коллектор с выходным патрубком; 4 – коническая камера; 5 – доски для образования конической камеры; 6 – бункер для пыли

Батарейный циклон типа ПС работает следующим образом. Запыленный газ поступает через входной патрубок 2 в коническую камеру циклона,

образующегося досками 5. В ней он равномерно распределяется по элементам 1, газ входит в тангенциальные патрубки элементов 1, где приобретает вращательного движения. За счет центробежных сил пыль оседает в нижнюю часть элементов 1, откуда попадает в бункер 6. Очищенный газ отводится через коллектор 3.

Характеристики батарейных циклонов различных типов приведены в табл. 1.3 и 1.4.

Таблица 1.3 – Характеристика батарейных циклонов типа ПС с 5 и 8 рядами в глубину.

Тип секции	Число элементов в ряду	Общее количество элементов в секции	Примечание
5 рядов в глубину (ПС-5)			
ПС-5-25	5	25	Для элементов диаметром 100 мм
ПС-5-30	6	30	То же 150 мм
ПС-5-35	7	35	То же 100, 150
ПС-5-40	8	40	и 250 мм
ПС-5-45	9	45	

продолжение таблицы

8 рядов в глубину (ПС-8) (для элементов диаметром 100, 150 и 250 мм)			
ПС-8-64	8	64	-
ПС-8-72	9	72	-
ПС-8-80	10	80	В бункере рекомендуется ставить перегородку
ПС-8-88	11	88	
ПС-8-94	12	96	Установка перегородки в бункере обязательное
ПС-8-104	13	104	
ПС-8-112	14	112	

Таблица 1.4 – Тип размеры батарейных циклонов БМУ-М

Тип и размер циклона	Число элементов по ширине	Предельное значение числа элементов, шт	Предельное значение суммарного сечения, м <sup>2</sup>
1×10xm	7...15	70...150	2,93...6,28
2×10xm	7...15	140...300	5,87...12,57
4×10xm	7...15	280...600	11,73...25,14
2×10xm	7...15	168...360	7,04...15,08
4×10xm	7...15	336...720	14,08...30,17
2×10xm	7...24	196...672	8,21...28,16

4×10xm	7...24	392...1344	16,42...56,31
1×10xm	7...15	70...150	2,93...6,28

Таблица 1.5 – Характеристика четыре секционных батарейных циклонов конструкции ЦКТИ

Тип и размер циклона		Количество циклонов в секции		Общее количество элементов на котел	Условное сечение батарейного циклона, м <sup>2</sup>	Расход газа, м <sup>3</sup> /с, при температуре 135°С и давлении	
		по глубине	по ширине			450 Н/м <sup>2</sup>	500 Н/м <sup>2</sup>
БЦ БЦА БЦТ	4×9×10	9	10	360	18,20	72,2	83,5
БЦ БЦА БЦТ	4×10×10	10	10	400	20,20	80,2	92,7
БЦ БЦА БЦТ	4×10×11	10	11	440	22,25	88,3	102,3
БЦ БЦА БЦТ	4×10×12	10	12	480	24,25	96,1	111,4
БЦ БЦА БЦТ	4×11×12	11	12	528	26,70	106,0	122,5
БЦ БЦА БЦТ	4×10×14	10	14	560	28,30	112,3	130,0
БЦ БЦА БЦТ	4×11×14	11	14	616	31,15	123,7	143,0
БЦ БЦА БЦТ	4×11×16	11	16	704	35,60	141,3	163,5
БЦ БЦА БЦТ	4×11×18	11	18	792	39,5	156,7	181,0

Таблица 1.6– Характеристика батарейного циклона типа ПБЦ

Марка циклона	Производительность, тыс. м <sup>3</sup> /ч	Количество циклонных элементов	Высота, мм	Масса, т
ПБЦ-15	12...15	24	5 270	4
ПБЦ-25	25...30	36	5 760	5
ПБЦ-35	35...40	48	6 400	6,1
ПБЦ-50	50...60	96	6 550	12,5

В маркировке циклонов приняты следующие обозначения: первая цифра – количество секций, вторая – количество элементов по глубине, т – количество элементов по ширине.

Общий коэффициент очистки с учетом рециркуляции

$$\Psi_3 = \frac{0,9\Psi_{\text{ц}} - \Psi}{1 - 0,9\Psi(1 - \Psi_{\text{ц}})}, \quad (1.5)$$

где  $\Psi_{\text{ц}}$  - коэффициент очистки в циклоне всасывающей линии;

$\Psi$  - коэффициент очистки в одиночном циклоне.

## 1.5 Вихревые и динамические пылеуловители.

Принцип работы вихревых пылеуловителей основан на действии центробежных сил на частицу пыли. Высокая эффективность очистки газов от мелкодисперсных частиц пыли (3...5 мкм). Они также могут очищать газы с температурой до 700°C. Их недостатками являются сложная строение и трудности в эксплуатации, а также необходимость установки дополнительного устройства для подачи вторичного воздуха.

По конструктивным особенностям (рис. 13) вихревые пылеуловители бывают сопловые (а) и лопаточек (б).

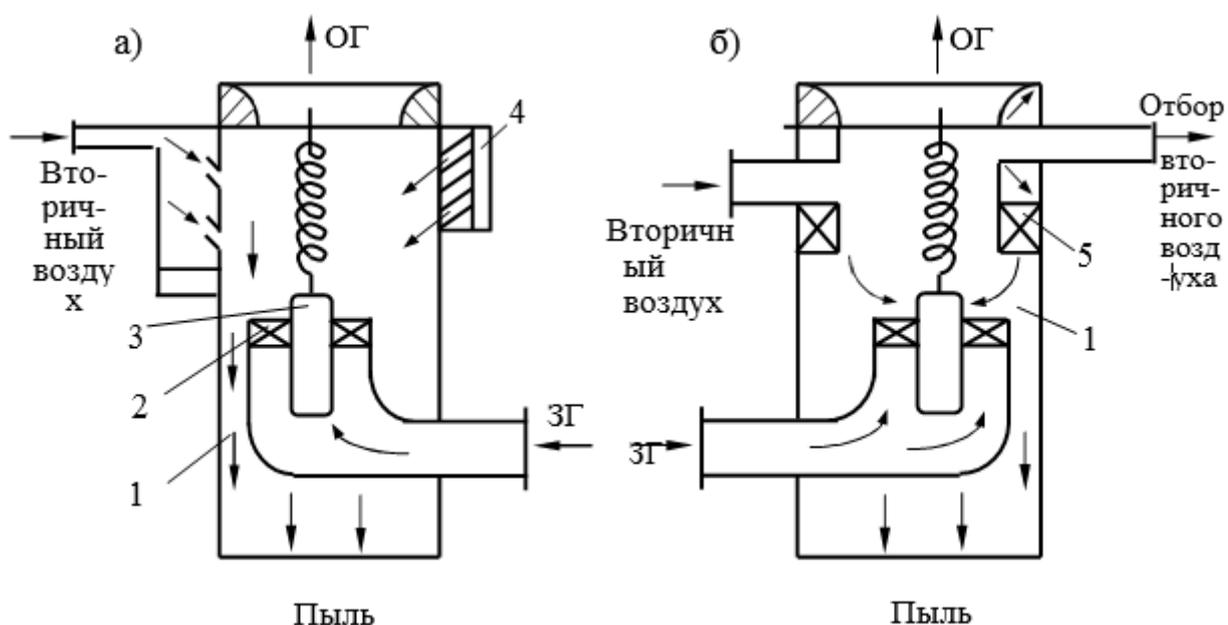


Рисунок 13 – Конструктивные схемы вихревых пылеуловителей: 1 – рабочая камера; 2 – подпорная шайба; 3 – лопастный завихритель; 4 – сопловой завихритель; 5 – кольцевой завихритель лопаточной.

Запыленный газ поступает в рабочую камеру 1 через входной патрубок с лопастным завихрителем 2. Лопастной завихрителем 2 закручивает поток. Центробежные силы, возникающие при этом, отбрасывают частицы пыли к стенкам аппарата. Встречный поток вторичного воздуха, что одновременно направляется в камеру 1, закручивается при помощи соплового 4 (рис. 13, а) или кольцевого лопаточного 5 (рис. 13, б) завихрителя. Направление движения этого по - тока вдоль стенок камеры позволяет отводить всю пыль в

специальный бункер. Вторичный воздух можно забирать из потока, очищенного или запыленного газа, а также из внешней среды.

Производительность группы вихревых пылеуловителей до 315 000 м<sup>3</sup>/ч запыленного газа.

Очистка газа в динамических ротационных пылеуловителях осуществляется за счет центробежных сил, возникающих при вращении рабочего колеса. Они выполняют одновременно функции вентилятора или дымососа и аппарата для выделения частиц пыли из газа.

По принципу действия динамические пылеуловители делятся на две группы. В аппаратах первой группы отделяемые частицы пыли имеют направление движения совпадает с направлением движения газа, то есть в них центробежная сила направлена навстречу воздушному потоку.

В аппаратах второй группы частицы улавливаются, выделяются из потока в направлении, противоположном направлению движения газа.

Конструктивные схемы аппаратов первой (а) и второй (б) групп показаны на рис. 14.

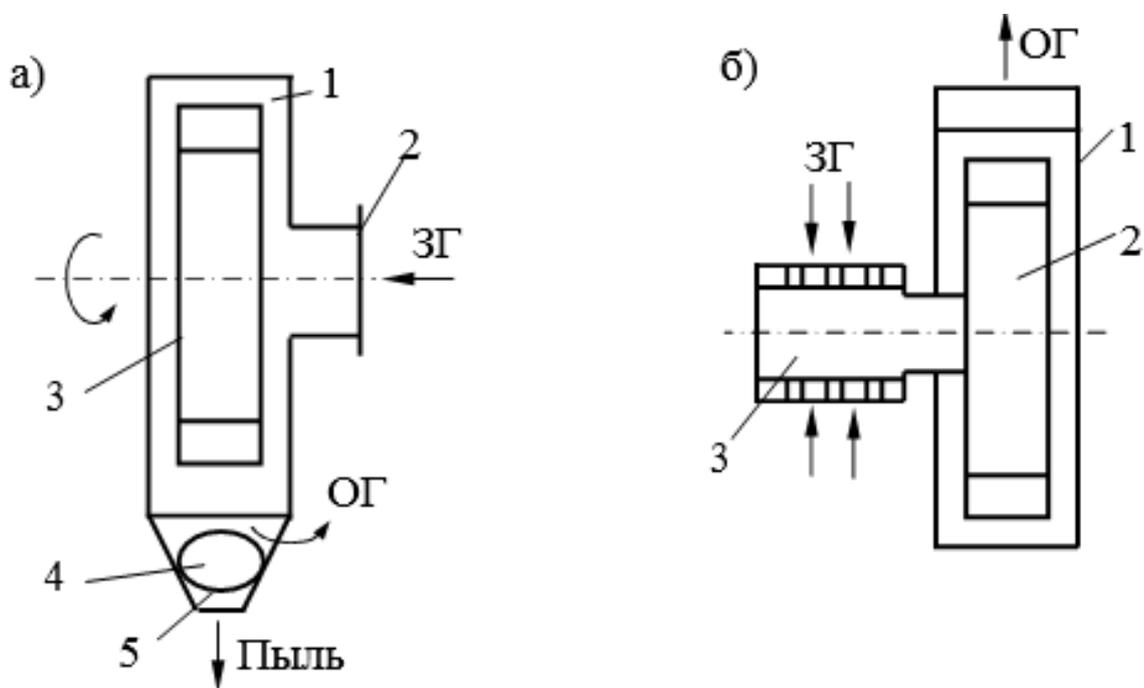


Рисунок 14 – Конструктивные схемы динамических пылеуловителей: а) 1 – корпус в виде улитки; 2 – входной патрубок запыленного газа;

3 – центробежное колесо; 4 - выходной патрубок очищенного газа; 5 - пылесборник; б) 1 - корпус; 2 - центробежное колесо; 3 – барабан с отверстиями, вращающийся.

В аппаратах первой группы отделяемые частицы вместе с газом вращаются в корпусе 1. Под действием центробежных сил частицы отражаются к стенкам корпуса 1 и оттуда поступают в пылесборник 5. Очищенный газ выходит через патрубок 4.

В аппаратах второй группы газ очищается с помощью центробежного колеса 2, которое размещено в корпусе 1, засасывается в барабан 3, который вращается через отверстия на его боковой поверхности. В пограничном слое частота вращения пылегазового потока достигает величины круговой частота вращения барабана. Благодаря этому частицы пыли, преодолевая силы аэродинамического сопротивления газа, отбрасываются от поверхности барабана в радиальном направлении.

Динамические пылеуловители компактны, надежны в работе, им не нужны дополнительные очистки газа, могут улавливать образованную пыль. Недостатком этих аппаратов является невысокая степень очистки (80-90%) и повышенная энергоемкость.

#### 1.6 Недостатки существующих методов очистки природного газа от дисперсных примесей

Существует большое разнообразие аппаратов газосепарации, выбор которых зависит от экспериментальных и эксплуатационных показателей установок. Надежность и эффективность эксплуатации систем газоочистки зависит от физико-химических свойств твердых частиц, термодинамических параметров проведения процесса, особенностей оборудования и видов топлива.

В зависимости от перечисленных параметров концентрация частиц в газах и их дисперсность могут изменяться. Кроме того, частицы и твердые включения имеют различные размеры и способны к активной агломерации, что существенно усложняет процесс пылеочистки. В общем случае процесс

пылеотделения состоит из нескольких этапов: закрутка потока, вывод частиц из сепарационной зоны, формирование слоя в приемнике, удаление уловленной пыли. Нарушение или неустойчивость работы любой из этих этапов приводит к неудовлетворительной работе пылеуловителя.

Многие специализированные источники литературы приводят данные, что в условиях производства пылеуловители работают в иных, нежели в лабораторных условиях. А именно, аппараты работают в условиях абразивного износа, налипания пыли, зависания пыли, изменение условий сепарации при различной концентрации пыли в газовом потоке. Таким образом очевидно, что расчетные и реальные показатели работы газоочистных сооружений имеют несоответствия.

Исследования установили, что в технологии сбора и транспортировки газа случаются ситуации, когда газ подают с большим расходом. Это приводит к осаждению частиц на стенках и их агломерации. Размеры частиц могут в десятки раз превышать экспериментальные и расчетные значения фракции, что резко снижает эффективность очистки газа. Происходит забивание сепарационных элементов, засорение фильтров и выход из строя, неработоспособность аппаратов сепарационной очистки.

Опыт эксплуатации установок очистки природного газа показывает, что на производстве может иметь место залпового поступления пыли. В этом случае сепарационные установки перестают выполнять свою функцию из-за засорения части циклонов, возникновения перетоков и факелов в пылесборнике. Такой пылеуловитель требует улучшения эффективности за счет ремонта и дорогостоящей замены оборудования.

Последствиями такой неустойчивости в работе центробежных аппаратов газоочистки становятся сброс газов на факел для сжигания, перепуски газа в системы транспортировки, разрушение компрессоров и, наконец, ухудшение качества продукции у потребителя.

## 2. Обеспыливание инерционными аппаратами

Технологические выбросы загрязняющих веществ в атмосферу увеличиваются по мере роста промышленного производства.

В газовой промышленности инерционные пылеуловители в основном получили применение в обустройстве промыслов и, очевидно, при определенных условиях могут быть использованы на компрессорных станциях. К данному типу аппаратов относится обширная группа пылеуловителей, в которых очистка газа от пыли происходит при изменении направления движения газового потока.

Независимо от природы сил, действующих на частицы пыли, различают сухие и мокрые пылеулавливающие аппараты. Применение жидкости не исключает действия в них вышеперечисленных сил. Жидкость в этих аппаратах способствует главным образом удержанию твердых частиц, выделившихся из газового потока, и используется для удаления уловленных частиц из аппарата.

Закрученные двухфазные потоки широко применяются в технических устройствах для интенсификации процессов массообмена и сепарации (сушка дисперсных материалов, воздушная пылеулавливание, разделение энергии в трубах Ранка и т. Д.). Для построения нового и эффективного использования известных вихревых устройств необходимо улучшить способы расчета двухфазных вихревых потоков. На данный момент нет единой концепции правильного подхода к расчету движения частиц. Модель, основанная на концепции «траектории частиц», считается неверной из-за отсутствия учета влияния напряжения Рейнольдса на частицу. С другой стороны, преимущества лагранжевого подхода, который ближе к реальным процессам и позволяют получить необходимую информацию о траекториях частиц, время нахождения частиц в аппарате, минимальный размер захваченных частиц, неоспоримы.

Таблица 2.1. Требования, предъявляемые к качеству природного газа

Наименование показателя	Значение для макроклиматических районов				Метод испытания
	Умеренный		Холодный		
	с 01.05 по 30.09	с 01.10 по 30.04	с 01.05 по 30.09	с 01.10 по 30.04	
Точка росы газа по влаге, °С, не выше	-3	-5	-10	-20	По ГОСТ 20060
Точка росы газа по углеводородам, °С, не выше	0	0	-5	-10	По ГОСТ 20061
Масса сероводорода, г/м <sup>3</sup> , не более	0,007 (0,02)	0,007 (0,02)	0,007 (0,02)	0,007 (0,02)	По ГОСТ 22387.2
Масса меркаптановой серы, г/м <sup>3</sup> , не более	0,016 (0,036)	0,016 (0,036)	0,016 (0,036)	0,016 (0,036)	По ГОСТ 22387.2
Масса механических примесей, г на 1 м <sup>3</sup> , не более	0,001				ГОСТ 22387.4
Объемная доля кислорода, %, не более	32,5	32,5	32,5	32,5	По ГОСТ 23781

Пылеуловители легче отбивают крупную фракцию, а мелкая – увлекается выходящим из пылеуловителя газом и составляет запыленность газа на входе защищаемого оборудования. Как показала практика, при скоростях, имеющих место в проточной части нагнетателя, мелкие частицы пыли (до 15 мк) движутся со скоростью потока, следуя его направлению, и лишь более крупные частицы (>15-20 мк) при криволинейном движении выносятся центробежной силой из потока и ударяются о встречающуюся на их пути поверхность.

Считается, что механизм образования жгутов связан с особенностями движения потока неоднородных по плотности смесей вблизи вогнутой криволинейной стенки. Здесь для ламинарного течения, интенсивность вихрей Тейлора-Гёртлера усиливается. Приводятся данные о визуальном контроле перемещений жгутов, которые могут быть использованы для определения скорости потока газа в разных сечениях. Оказалось, что значения циркуляции газовой фазы по высоте циклона в несколько раз различаются, особенно ближе к пылевывпускному отверстию из конической части циклона.

Процессы протекания двухфазной среды в циклонном аппарате являются сложными и до сих пор нет физически обоснованной модели для превращения дисперсной среды из аэрозольного состояния в объемную среду в

пылесборнике. В отсутствие пылевых отложений в зоне выхода пыли противотока конического циклона концентрация пылевых частиц увеличивается в сотни раз, в результате чего происходит торможение потока из-за увеличения значения касательного напряжения на стенке.

В работе [30] приведены данные о распределении давлений на двухфазном потоке с малой концентрацией частиц в вихревой камере, из которой можно рассчитать распределение окружных скоростей воздуха. Для определения времени прохождения система используется для измерения скорости воздуха на входе в аппарат. Было выполнено мгновенное удаление циклона из разрешающего коллектора, было определено количество пыли, падающей в циклоне.

## 2.1 Описание экспериментального стенда

Представлена схема компоновки стенда, на котором проводились эксперименты. Изменяя условия движения потока по криволинейному каналу был достигнут наиболее эффективный результат очистки газа от пыли. Экспериментальная установка состоит из противоточный пыле-концентратора, противоточный циклонного аппарата, тканевого фильтра и вихревой камеры:

Первая ступень – противоточный пыле-концентратор, который изображен на рисунке 15. Физический процесс, имеющий место в пыле-концентраторах, включает движение пыли в газовом потоке до соприкосновения ее с внутренней поверхностью аппарата, взаимодействие пыли с этой поверхностью, движение пыли после ее рикошетирувания от данной поверхности.

Основная часть потока движется с уменьшающейся концентрацией частиц к центральному патрубку с радиусом  $R_1$ , а высококонцентрированная смесь газа с частицами движется по периферии конического сепаратора и в области от  $R_B$  до  $R_2$  и выводится из концентратора с последующим окончательным осаждением частиц в дополнительном пылеотделителе. Т.е. процессы сепарации и отвода пыли в противоточном пыле-концентраторе

конструктивно разделены. При этом малая часть потока транспортирует частицы в дополнительный пылеотделитель, а большая часть потока разворачивается в сторону центрального газоотводного патрубка. В области ограниченной конической поверхностью, показанной пунктиром, движение газа осуществляется в сторону выходной трубы. В периферийной области газ движется в сторону вывода пыли. Между этими областями газ перетекает в радиальном направлении от периферии к оси.

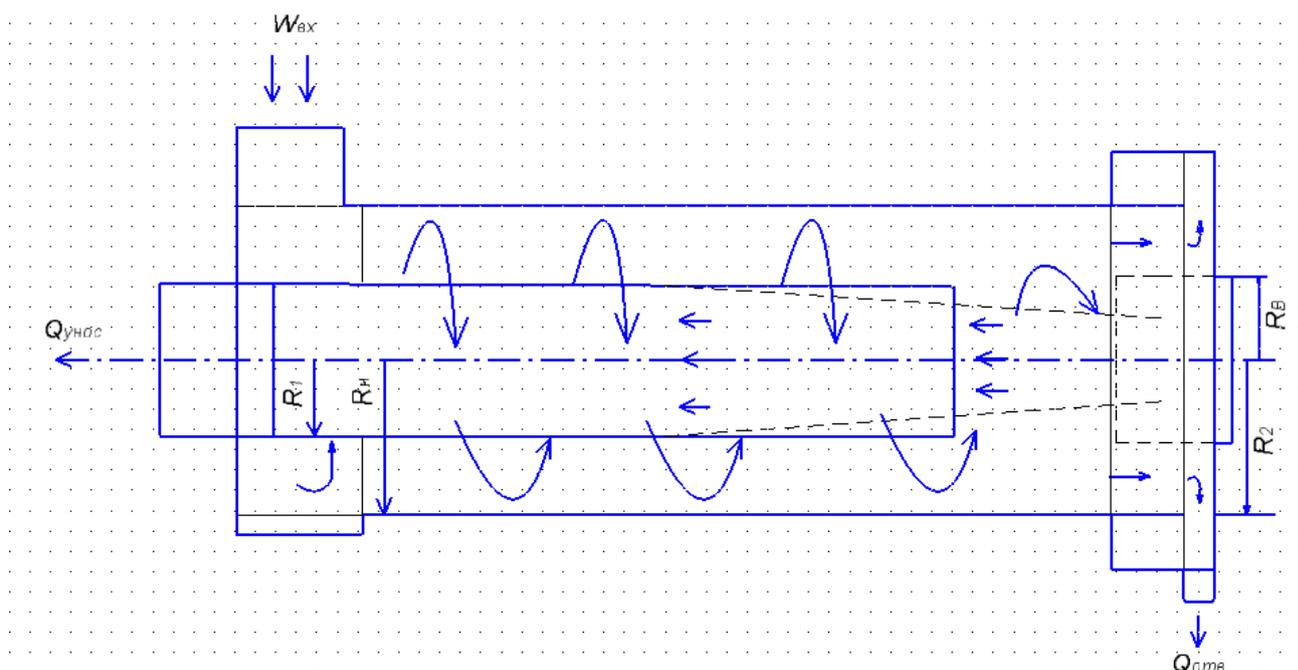


Рисунок.15 – Схема движения потока в противоточном пыле-концентраторе

С помощью дифференциального манометра «Testo-512» подключенного к расходомеру во впускном патрубке с внутренним диаметром 38 мм, была измерена скорость входного потока (вход С), максимальное значение которой составило 22 м/с. Этот тип манометра позволяет оценивать перепад между статическим и полным давлением и оценивать скорость потока из полученных данных.

2. Вторая ступень – противоточный циклонный аппарат, изображен на рисунке 16. Наиболее эффективным осадителем является противоточный циклон с собственным приемником пыли, в котором транспортирующий в него пыль поток газа в объеме замедляет движение и формируется слой из частиц, причем выделяются и частицы менее 10 мкм. В противоточном циклоне

основная часть взвешенных в газе частиц отбрасывается к стенке циклона, собирается в жгуты и вместе с частью газового потока движется вниз, проходя через пылевывпускное отверстие в бункер циклона. В бункере завихренный поток меняет свое направление и теряет скорость, вследствие чего происходит выпадение сгустков частиц. Освобожденные от частиц газы, присоединяя к себе части потока, отделяющиеся от нисходящей спирали, движутся по восходящей (внутренней) спирали к выхлопной трубе.

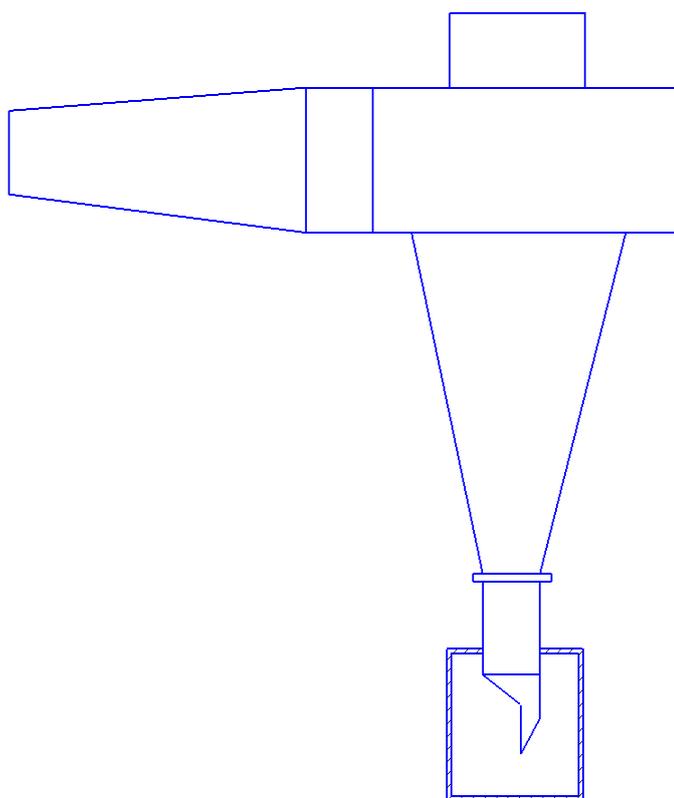


Рисунок 16 – Противоточный циклонный аппарат

«Третья ступень – вихревая камера, изображена на рисунке 17. В вихревой камере воздух при вихрестопе движется к выходному патрубку, а частицы центробежными силами концентрируются у стенки и выходят в пылевыводной патрубком. Процесс построен таким образом, что в потоке присутствует некоторое количество гранулита, который препятствует налипанию частиц на стенки. Несущая транспортирующая способность сохраняется максимальной во всей области сечения, поэтому забивки и зависания примеси в концентрате не наблюдается.»

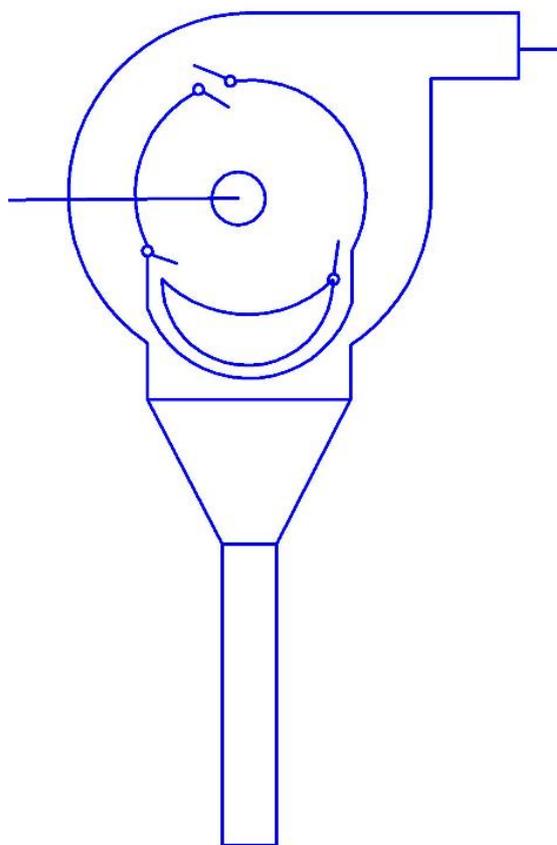


Рисунок 17 – Схема вихревой камеры

Четвертая ступень - фильтр, изображен на рисунке 18. Фильтр предназначен для задерживания материала, не уловленного в пыле-концентраторе и противоточном циклоне.

Для обеспечения стабильного процесса очистки тканевого фильтра от уловленных твердых частиц, огромную роль играют не только используемый метод и режим регенерации, но также способность ткани к регенерации. Регенерация ткани зависит от характера поверхности, гибкости ткани дополнительной специальной обработки поверхности.

Основными причинами забивания тканей является повышенная гигроскопичность пылей, высокая влажность газов и наличие в некоторых выбросах пылей с чрезмерной электрической зарядкой.

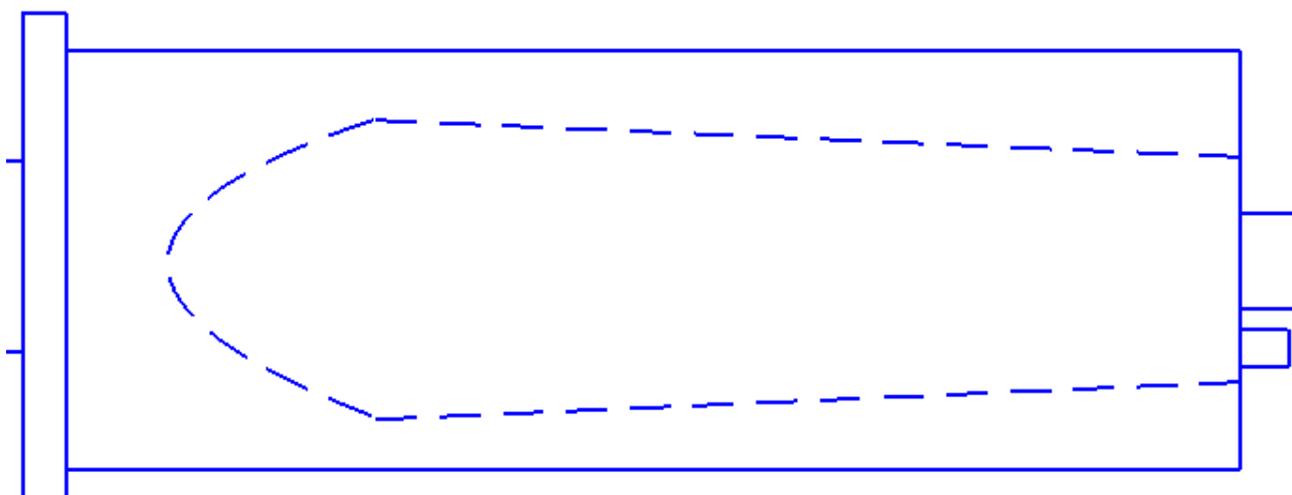


Рисунок 18 – Схема тканевого фильтра изображено штрихом.

Так же в экспериментальных установках использовался вентилятор ВЦ-5-35 №4, производителя ООО "Тара". Вентилятор ВЦ-5-35 №4 среднего давления, имеет одностороннее всасывания. Корпус – спиральный поворотный. Лопатки рабочего колеса – загнутые назад, в количестве 9 штук. Варианты направление вращения – правое, левое.

Данный вентилятор применяется в вентиляционных системах и системах кондиционирования. В системах пневмотранспорта в пищевой промышленности, для перемещения сыпучих и гранулированных материалов.

Вентилятор ВЦ 5-35 имеет наибольшую эффективность эксплуатации в зонах с умеренным, тропическим климатами, второй и третьей категорий размещения. Размещение по первой категории разрешается при изолировании двигателя от внешней среды. Эксплуатация вентилятора разрешается в диапазоне температур от плюс 40 до минус 40 °С. Технические характеристики вентилятора ВЦ 5-35 №4 представлены в таблице 2.2

Таблица 2.2 - Технические характеристики ВЦ 5-35 №4

Тип вентилятора	Двигатель		Частота вращения, об/мин	Параметры в рабочей зоне	
	Типоразмер	Мощность, кВт		Производительность, тыс. м <sup>3</sup> /час	Полное давление, Па

ВЦ 5-35 №4	АДМ80В2	2,2	3000	0,86-2,5	2780-1800
------------	---------	-----	------	----------	-----------

На рисунке 19 представлен вентилятор ВЦ 5-35 №4.

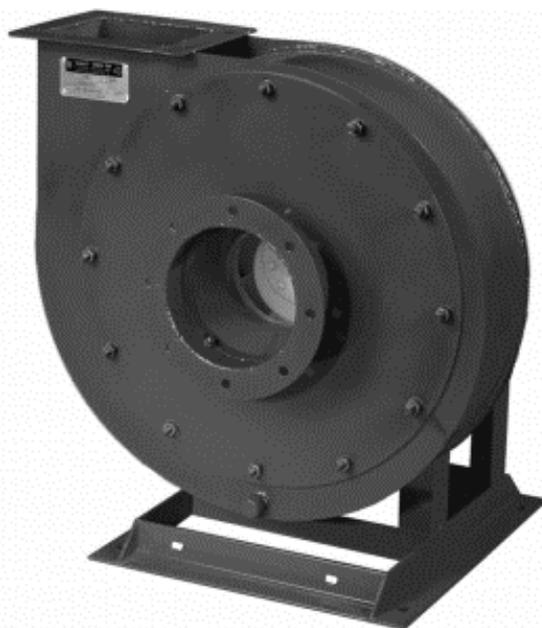


Рисунок 19 - вентилятор ВЦ-5-35 №4

Аэродинамическая характеристика вентилятора ВЦ-5-35 №4 представлена на рисунке 20.

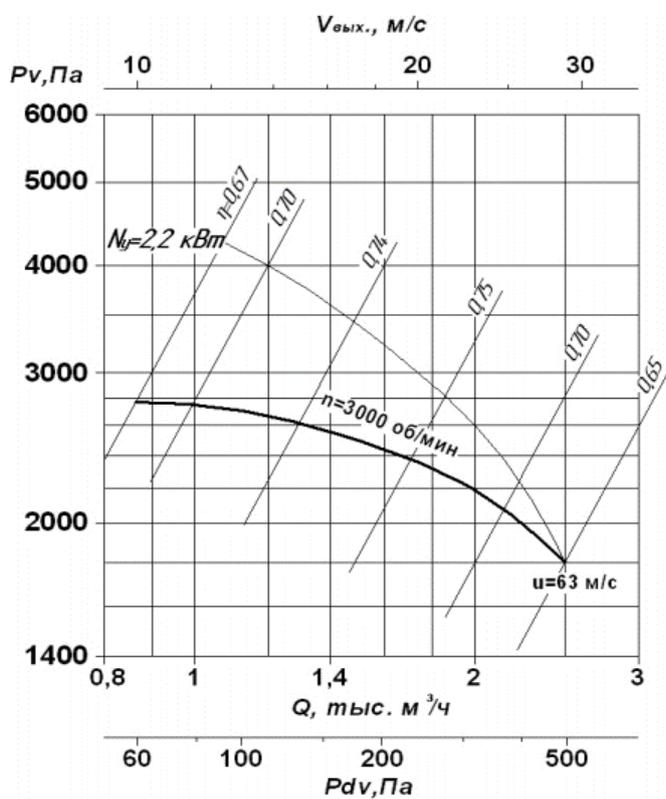


Рисунок 20 - Аэродинамическая характеристика вентилятора ВЦ-5-35 №4

Аэродинамической характеристика представляет собой зависимость полного давления, мощности потребляемой вентилятором, полного КПД при изменении расхода газового потока, при определенном значении плотности газа на всасе в рабочую камеру вентилятора и постоянном значении частоты вращения рабочего колеса.

Полное давление вентилятора равняется сумме статического и динамического давлений:

$$Pv = Psv + Pdv, \quad (2.1)$$

где  $Pv$  – полное давление, Па

$Psv$  – статическое давление, Па;

$Pdv$  – динамическое давление, Па.

$$Pdv = \frac{1}{2} \rho \left( \frac{Q}{F_B} \right)^2, \quad (2.2)$$

где  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;

$Q$  – объемный расход газа, м<sup>3</sup>/с;

$F_B$  – сечение входного отверстия в камеру вентилятора, м<sup>2</sup>.

### 3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью выполнения данного раздела является анализ экономической эффективности разработки экспериментального стенда. Оценка является комплексной и произведена в разрезе экономической эффективности, социальной значимости и других аспектов, так как оформление стенда и проведение опытов требует привлечения финансовых затрат и трудовых ресурсов, которые должны быть экономически оправданы и целесообразны.

#### 3.1. Планирование работ и оценка времени их выполнения

Для выполнения научных исследований сформирована рабочая группа, в состав которой входят руководитель и инженер. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В таблице 3.1 представлены все виды выполняемых работ и время их выполнения.

Таблица 3.1 – Перечень работ и оценки времени их выполнения

№ п/п	Наименование работ	Количество исполнителей		Продолжительность, дней	
		Инженер (10 р)	Руководитель (13 р)	Инженер (10 р)	Руководитель (13 р)
1	Выдача и получение задания	1	1	1	1
2	Обзор литературы по выбранной теме	1	-	5	-
3	Постановка целей и задач исследования (составление плана работы)	1	1	4	1
4	Выполнение графической части для изготовления стенда	1	1	5	2
5	Закупка оборудования, инструментов, деталей, а также заготовка образцов исследуемого материала	1	1	12	2
6	Монтаж исследовательского стенда	1	1	5	1
7	Оформление методического указания по работе за стендом	1	1	5	1

8	Проведение исследований за стендом	1	-	35	-
9	Анализ результатов исследований	1	-	7	-
	ИТОГО			79	8

### 3.1.1 Смета затрат на проект

Совокупность затрат на проект определяются по следующей формуле:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з/пл}} + K_{\text{с.о}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{накл}}, \text{ руб.} \quad (3.1)$$

Где  $K_{\text{мат}}$ - материальные затраты;

$K_{\text{ам}}$ -амортизация компьютерной техники;

$K_{\text{з/пл}}$ - затраты на заработную плату;

$K_{\text{с.о}}$ - затраты на социальные нужды;

$K_{\text{пр}}$ - прочие затраты;

$K_{\text{накл}}$ - накладные расходы.

### 3.1.2 Материальные затраты

Под материальными затратами понимается величина денежных средств, потраченных на канцелярские товары, необходимые для проведения работы. Величину этих затрат принимаем  $K_{\text{мат}}=1000$  руб.

### 3.1.3 Амортизация компьютерной техники

Амортизация показывает уменьшение стоимости компьютерной техники, на которой выполнялась работа, вследствие ее износа. Амортизация компьютерной техники рассчитывается как:

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{кт}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}}, \text{ руб./год.} \quad (3.2)$$

где  $T_{\text{исп.кт}}$ - время использования компьютерной техники;

$T_{\text{кал}}$ - календарное время;

$C_{\text{кт}}$ - цена компьютерной техники;

$T_{\text{сл}}$ - срок службы компьютерной техники.

$$K_{\text{ам}} = \frac{79+8}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 1192 \text{ руб./год.} \quad (3.3)$$

### 3.1.4 Затраты на заработную плату

Затраты на заработную плату включают в себя выплаты инженеру, разрабатывающему проект, а также научному руководителю и рассчитываются как:

$$K_{з/пл} = ЗП_{инж}^{\phi} + ЗП_{нр}^{\phi}, \text{ руб.} \quad (3.4)$$

где  $ЗП_{инж}^{\phi}$  - фактическая заработная плата инженера (инженер – 17000 руб.),  
 $ЗП_{нр}^{\phi}$  - заработная плата научного руководителя (доцент – 26300 руб.).

Месячный оклад:

$$ЗП_{инж}^M = ЗП_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.}; \quad (3.5)$$

$$ЗП_{нр}^M = ЗП_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 26300 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 37609 \text{ руб.}, \quad (3.6)$$

где  $ЗП_{инж}^M$  - месячная заработная плата инженера;

$ЗП_{нр}^M$  - месячная заработная плата научного руководителя;

$ЗП_0$  - месячный оклад (инженер 17000 руб., н.р. 26300 руб.);

$K_1$  – коэффициент учитывающий отпуск, равен 1,1 (10%);

$K_2$  - районный коэффициент, равен 1,3 (30%).

Фактическая заработная плата:

$$ЗП_{\phi} = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n^{\phi}, \text{ руб.} \quad (3.7)$$

где  $ЗП_{мес}$  - месячная заработная плата; 21 - среднее число рабочих дней в месяце;  $n^{\phi}$  - фактическое число дней в проекте.

$$ЗП_{инж}^{\phi} = \frac{24310}{21} \cdot 79 = 91451,9 \text{ руб.} \quad (3.8)$$

$$ЗП_{нр}^{\phi} = \frac{37609}{21} \cdot 8 = 14327,2 \text{ руб.} \quad (3.9)$$

$$K_{з/пл} = 91451,9 + 14327,2 = 105780 \text{ руб.} \quad (3.10)$$

### 3.1.5 Затраты на социальные нужды

Затраты на социальные нужды принимаются как 30 % от затрат на заработную плату, они включают в себя отчисления в Фонд социального страхования Российской Федерации, Пенсионный фонд Российской Федерации, Государственный фонд занятости населения Российской

Федерации и фонды обязательного медицинского страхования.

$$K_{\text{соц/н}} = K_{\text{з/пл}} \cdot 0,3, \text{ руб.} \quad (3.11)$$

$$K_{\text{соц/н}} = 105780 \cdot 0,3 = 31734 \text{ руб.} \quad (3.12)$$

### 3.1.6 Прочие затраты

Прочие затраты принимаются как 10 % от суммы материальных затрат, амортизационных отчислений, затрат на заработную плату и затрат на социальные нужды.

$$K_{\text{пр}} = (K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з/пл}} + K_{\text{соц/н}}) \cdot 0,1, \text{ руб.} \quad (3.13)$$

$$K_{\text{пр}} = (1000 + 1192 + 105780 + 31734) \cdot 0,1 = 13971 \text{ руб.} \quad (3.14)$$

### 3.1.7 Накладные расходы

Накладные расходы – дополнительные к основным затратам расходы, необходимые для обеспечения процессов производства, связанные с управлением, обслуживанием, содержанием и эксплуатацией оборудования. Накладные расходы принимаются в размере 200 % от затрат на заработную плату.

$$K_{\text{накл}} = K_{\text{з/пл}} \cdot 2, \text{ руб.} \quad (3.15)$$

$$K_{\text{накл}} = 105780 \cdot 2 = 211560 \text{ руб.} \quad (3.16)$$

В таблице 3.2 представлена смета затрат на проект.

Таблица 3.2 – Смета затрат на проект

№ п/п	Элементы затрат	Стоимость, руб
1	Материальные затраты	1000
2	Амортизация компьютерной техники	1192
3	Затраты на заработную плату	105780
4	Затраты на социальные нужды	31734
5	Прочие затраты	13971
6	Накладные расходы	211560
<b>Итого:</b>		<b>365237</b>

### 3.2. Смета затрат на оборудование и монтажные работы

В таблице 3.3 представлен перечень используемого оборудования в проекте и его стоимость.

Таблица 3.3 – Затраты на оборудование

Наименование	Цена за единицу, руб.	Количество, шт.	Суммарная цена, Руб.
Центробежный вентилятор	15 000	1	15 000
Улиточная камера	4 100	1	5 100
Противоточный концентратор	2 050	1	2 050
Противоточный циклон	1 000	1	2000
Резиновый шланг	500	1	500
Основной фильтр	750	1	750
Вспомогательный фильтр	550	1	550
<b>Итого (I<sub>рм</sub>):</b>			25950

Затраты на монтажные работы, транспортировку и демонтаж оборудования составляют 10 % от суммы затрат на технические средства:

$$I_{\text{МОНТ}} = 0,1 \cdot I_{\text{обор}} \text{ руб.} \quad (3.17)$$

где  $I_{\text{обор}}$  - затраты на оборудование.

$$I_{\text{МОНТ}} = 0,1 \cdot 25950 = 2595 \text{ руб.} \quad (3.18)$$

Суммарные затраты на оборудование, монтажные работы и транспортировку:

$$I_{\text{итог}} = I_{\text{обор}} + I_{\text{МОНТ}} = 25950 + 2595 = 28545 \text{ руб.} \quad (3.19)$$

#### Вывод

В данном разделе приведён расчёт затрат на разработку экспериментального стенда. По результату этих расчётов была составлена смета затрат на изготовление стенда. Изготовленный экспериментальный стенд является наглядным примером пыле- золоулавливающей установки. Стенд

предназначен для исследования характеристик инерционных пылеотделителей и проведение лабораторных работ студентами, в ходе которых они смогут познакомиться с процессами обеспыливания в реальных условиях.