

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

На правах рукописи



НГУЕН ВУ ЛИНЬ

**ОЧИСТКА ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ УГОЛЬНЫХ ТЭС ОТ
МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ СЕПАРАТОРАХ**

Специальность: 05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Дмитриев А.В.

Казань – 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Глава 1 Обзор существующих способов и устройств по очистке газовых потоков от мелкодисперсных частиц.....	9
1.1 Особенности работы ТЭС Вьетнама использующих твердые виды топлива.....	9
1.2 Современное состояние исследований в области очистки газовых выбросов .	18
1.3 Инерционные пылеуловители.....	19
1.4 Электроосаждение.....	25
1.5 Рукавные фильтры	27
1.6 Оценка литературного обзора.....	29
1.7 Современные технологии очистки газов на ТЭС	30
Глава 2 Очистка дымовых газов ТЭС от мелкодисперсных частиц	43
2.1 Разработка сепаратора для улавливания мелкодисперсных частиц	43
2.2 Установка сепаратора в технологическую схему очистки газовых выбросов от твердых частиц	45
2.3 Определение оптимальных соотношений между элементами сепаратора	47
2.4 Определение оптимального количества рядов внутри сепаратора.....	53
2.5 Эффективность первого ряда прямоугольного сепаратора	57
2.6 Влияние формы элементов сепаратора на эффективность очистки газовых выбросов ТЭС и гидравлического сопротивления аппарата.....	61
2.7 Исследование структуры газового потока внутри сепаратора.....	73
2.8 Оценка вклада центробежных сил при очистке газовых выбросов ТЭС от мелкодисперсных частиц.....	78
2.9 Сравнение предлагаемого прямоугольного сепаратора с циклоном	94
2.10 Оценочная методика расчета эффективности прямоугольного сепаратора ...	97
Глава 3 Экспериментальные исследования улавливания мелкодисперсных твердых частиц сепаратором с прямоугольными элементами.....	102
3.1 Улавливание аэрозолей в сепараторе с прямоугольными элементами	102
3.2 Улавливание мелкодисперсного материала сепаратором	109
Глава 4. Оценка промышленного внедрения разработанного устройства.....	115

4.1 Улавливание мелкодисперсных частиц в энергосистеме в компании «КАМАТЕК»	115
4.2 Конструктивные особенности прямоугольного сепаратора.....	118
4.3 Оценка экономической эффективности внедрения прямоугольных сепараторов на ТЭС 1 г. Уонг Би.....	120
Основные результаты и выводы	126
Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы.....	126
Библиографический список.....	128

Введение

Актуальность работы. Интенсификация технологических процессов и создание высокопроизводительных аппаратов в энергетической, химической, и пищевой отраслях промышленности приводит к неизбежному росту выбросов в атмосферу значительного количества токсичной пыли и вредных газообразных примесей. По данным ООН, ежегодно в атмосферу выбрасывается 2,5 млн. тонн пыли.

Однако к процессу газоочистки необходимо подходить рациональным путем, совмещающим высокую эффективность, надежность и оправданную стоимость. В связи с подорожанием курса доллара и сложной экономической ситуации в стране особое внимание уделяется стоимости закупаемого оборудования для очистки газов от вредных частиц и их максимально эффективному использованию. Также следует обратить внимание на возможность повторного использования продуктов улавливания при очистке газовых выбросов аппаратами для очистки. Например, зола ТЭС находит широкое применение при изготовлении строительных материалов: кирпича, бетонных камней, аглопорита, керамзита и др.

Основными устройства для очистки газов от золы на ТЭС и от других вредных частиц на химических и пищевых производствах являются электрофильтры, инерционные пылеуловители (различные модификации циклонов), рукавные фильтры и мокрые аппараты. Однако из-за низкой эффективности этого оборудования при улавливании средне- и мелкодисперсной пыли, необходимости частой замены или чистки фильтрующих элементов, область их применения ограничена. Кроме того, гидравлическое сопротивление таких аппаратов может достигать 3000 Па, что приводит к увеличению энергетических затрат на проведение процессов пылегазоочистки. В связи с этим разработка новых устройств для увеличения эффективности очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц на ТЭС является актуальной задачей.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской

Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-4522.2018.8 на выполнение научно-исследовательских работ по теме «Разработка перспективной технологии сепарации мелкодисперсных твердых или жидких частиц из газового потока».

Объектом исследования является очистка газовых выбросов ТЭС от мелкодисперсных частиц в прямоугольных сепараторах.

Предметом исследования является сепарация мелкодисперсных частиц из дымовых газов ТЭС.

Цель работы и основные задачи исследования. Целью работы является разработка энергоэффективного устройства для очистки газовых выбросов ТЭС, от мелкодисперсных частиц.

В непосредственные задачи исследования входило:

1. На основе анализа недостатков существующих способов, предназначенных для очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц разработать новую конструкцию устройства, позволяющую повысить степень очистки и улавливания мелкодисперсных частиц из дымовых газов ТЭС.

2. Разработка устройства для улавливания и очистки мелкодисперсных частиц из газовых выбросов ТЭС, теоретическое и экспериментальное исследование влияния геометрических и технологических параметров на эффективность работы устройства.

3. Исследование процессов гравитационного и инерционного осаждения системы твердых частиц в предлагаемом сепараторе.

4. Разработать математическое описание процесса очистки дымовых газов ТЭС от мелкодисперсных частиц пыли в прямоугольном сепараторе.

5. Провести экспериментальные исследования устройства для проверки достоверности математического описания в зависимости от различных конструктивных параметров.

6. На основе анализа математического описания разработать инженерную методику расчета устройств очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц.

Методы исследования. В работе использованы методы экспериментальной физики и аэродинамики. Для расчетов и построения графических зависимостей использовались пакеты прикладных программ Microsoft Excel и ANSYS Fluent.

Научная новизна работы:

1. Разработано математическое описание процесса очистки дымовых газов угольных ТЭС от мелкодисперсных частиц в прямоугольном сепараторе и получены зависимости геометрических размеров аппарата от требуемой степени эффективности очистки.

2. Экспериментальным путем получены зависимости гидравлического сопротивления в прямоугольном сепараторе от скорости воздуха на входе в устройство и эффективности очистки газовых выбросов от чисел Стокса.

3. Получены экспериментальные зависимости эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц в предложенном аппарате от концентрации частиц в дымовых газах, скорости потока на входе в аппарат и размеров частиц.

4. Получены уравнения для расчета количества рядов и элементов в каждом ряду прямоугольного сепаратора в зависимости от параметров улавливаемых твердых частиц.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов математического моделирования подтверждается использованием фундаментальных уравнений сохранения и переноса массы и импульса, а также удовлетворительным согласованием рассчитываемых и экспериментальных данных. Достоверность опытных данных подтверждается их воспроизводимостью в однотипных сериях экспериментов, а также использованием для их получения современного, сертифицированного и поверенного оборудования.

Практическое значение работы:

1. Показана экономическая целесообразность использования предлагаемого аппарата в технологических процессах очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц на ТЭС 1 г. Уонг Би (Вьетнам).

2. Разработана конструкция прямоугольного сепаратора для очистки

газовых выбросов ТЭС от мелкодисперсных частиц.

3. Разработана инженерная методика расчета устройства для очистки дымовых газов от мелкодисперсных частиц, обеспечивающая возможность определения характерных параметров аппарата при различных характеристиках газовых потоков с целью оптимизации процесса их очистки дымовых газов ТЭС и технологических выбросов промышленных предприятий.

4. Предложенная конструкция устройства для очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц принята к внедрению на ООО «КАМАТЕК» г. Набережные Челны с целью повышения эффективности очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц пыли.

На защиту выносятся:

1. Результаты теоретического и экспериментального исследований работоспособности разработанного устройства в зависимости от различных конструктивных параметров и свойств дымовых газов.

2. Математическое описание процесса очистки дымовых газов ТЭС, работающих на твердых видах топлива, от мелкодисперсных частиц разработанным устройством.

3. Результаты экспериментальных исследований эффективности очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц разработанным устройством.

4. Результаты исследований влияния формы элементов внутри устройства на эффективность очистки газового потока от мелкодисперсных частиц и его гидравлическое сопротивление.

5. Инженерная методика расчета характерных параметров устройства для очистки дымовых газов ТЭС от мелкодисперсных частиц.

Апробация работы. Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных аспирантско-магистерских научных семинарах (Казань, 2017, 2018); ежегодных международных молодежных научно-технических конференциях «Гинчуринские чтения» (Казань, 2017, 2018, 2019); ежегодных международных научно-технических конференциях «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»

(Москва, 2019).

Публикация работы. По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работы, в том числе 3 статей, опубликованы в научных изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России для соискателей ученых степеней доктора и кандидата наук.

Вклад автора в проведенное исследование. Автор лично участвовал в постановке цели и задач исследований, разработке конструкции устройства, инженерных методиках расчета, в получении результатов, представленных в диссертации и публикациях.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» и охватывает следующие направления:

П1. Разработка научных основ методов расчета, выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы агрегатов, систем и тепловых электростанций в целом.

П3. Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий производства электрической энергии и тепла, использования топлива, водных и химических режимов, способов снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую среду.

П4. Разработка конструкций теплового и вспомогательного оборудования и компьютерных технологий их проектирования и диагностирования.

Глава 1 Обзор существующих способов и устройств по очистке газовых потоков от мелкодисперсных частиц

1.1 Особенности работы ТЭС Вьетнама использующих твердые виды топлива

По данным на 2017 год, общая установленная электрическая мощность Вьетнама составляет более 46 ГВт, из которых на ТЭС вырабатывается 17 ГВт, что составляет около 37%. Доля ТЭС во Вьетнаме находится в среднем в мире (37% по мощности и 32,7% по выработке по сравнению с 38,1% в мире). На душу населения ТЭС вырабатывает около 793 кВт*ч, что составляет 61,5% на душу населения в мире (1290 кВт*ч). Это очень мало по сравнению со средним показателем на душу населения во многих странах. В настоящее время во Вьетнаме действует около 30 тепловых электростанций, еще несколько тепловых электростанций находятся в стадии строительства и будут завершены в ближайшие несколько лет.

Основным сырьем, используемым в камерах сгорания для выработки электроэнергии на угольных тепловых электростанциях Вьетнама, является антрацит, бурый уголь и импортный битуминозный уголь. Уголь считается крупнейшим источником электроэнергии в мире из-за его высокой удельной теплоты сгорания и низкого содержания серы. Во Вьетнаме довольно большие запасы угля. Имеется два основных типа угля: антрацит и бурый уголь. Помимо использования на ТЭС, антрацит также используется в качестве сырья и исходного топлива для сталелитейной, никелевой, титановой, цементной, почвенной, электродной и химической промышленности. Однако внутренних добываемых запасов угля недостаточно для обеспечения топливом. Поэтому для обеспечения работы системы тепловых электростанций уголь импортируется. В основном это битуминозный уголь.



Рисунок 1.1 – Карта ТЭС Вьетнама до 2030 года

Таблица 1.1 – Примерный перечень угольных электростанций работающих во Вьетнаме

№	Название ТЭС	Установленная мощность, МВт	Регион	Время пуска
1	Ан Хан 1	2x58	Тхай Нгуен	2015
2	Кам Пха	2x340	Коанг Нинь	2011
3	Као Нган	2x57.5	Тхай Нгуен	2006
4	Дуен Хай 1	2x622	Ца Винь	2015
5	Мао Хе	2x220	Коанг Нинь	2013
6	Монг Дыонг 1	2x540	Коанг Нинь	2015
7	Монг Дыонг 2	2x620	Коанг Нинь	2015
8	На Дыонг 1	2x55	Ланг Шон	2005
9	Нинь Бинь	4x25	Нинь Бинь	1974
10	Фа Лай 1	4x110	Хай Дыонг	1986
11	Фа Лай 2	2x300	Хай Дыонг	2001
12	Шон Донг	2x110	Бак Жанг	2009
13	Уонг Би 1	50x55	Коанг Нинь	1975
14	Тхай Бинь 1	2x300	Тхай Бинь	2017
15	Вунг Анг 1	2x600	Ха Тинь	2015

Начиная с 2015 года Вьетнам стал импортером энергии с растущим объемом импорта угля, особенно из стран с большими запасами угля, подходящим для тепловых электростанций, например: Индонезия, Австралия и Российская Федерация.

Таблица 1.2 – Объем импорта угля Вьетнамом (тыс. тонн) в период 2015 - 2017 гг.

	2015 (тыс. тонн)	2016 (тыс. тонн)	2017 (тыс. тонн)
Общий объем импортированного угля	6900	13200	14500
Из Индонезии	1915	2946	6144
Из Австралии	1441	3961	3768
Из России	1400	3687	2401

По данным на 2020 год, общая мощность электростанций Вьетнама составляет около 75000 МВт, из которых на угольные электростанции приходится 48% от общей мощности. Ожидается, что к 2030 году общая мощность электростанций должна достичь 146800 МВт, а доля угольных электростанций увеличится до 51,6% с общей мощностью почти 76000 МВт. Потребность в угле для выработки тепловой энергии составит 64,1 млн. тонн в 2020 году и до 131,1 млн. тонн в 2030 году. Прогнозируется, что общий спрос на добычу угля в стране к 2030 году достигнет почти 157 миллионов тонн, в то время как внутренние добывающие мощности составляют всего 57 миллионов тонн, что означает, что Вьетнам должен начать импортировать 100 миллионов тонн угля к 2030 году.

На тепловых электростанциях во Вьетнаме на ТЭС часто используются два типа технологий: технология сжигания угольной пыли и технология сжигания в циркулирующем кипящем слое (ЦКС).

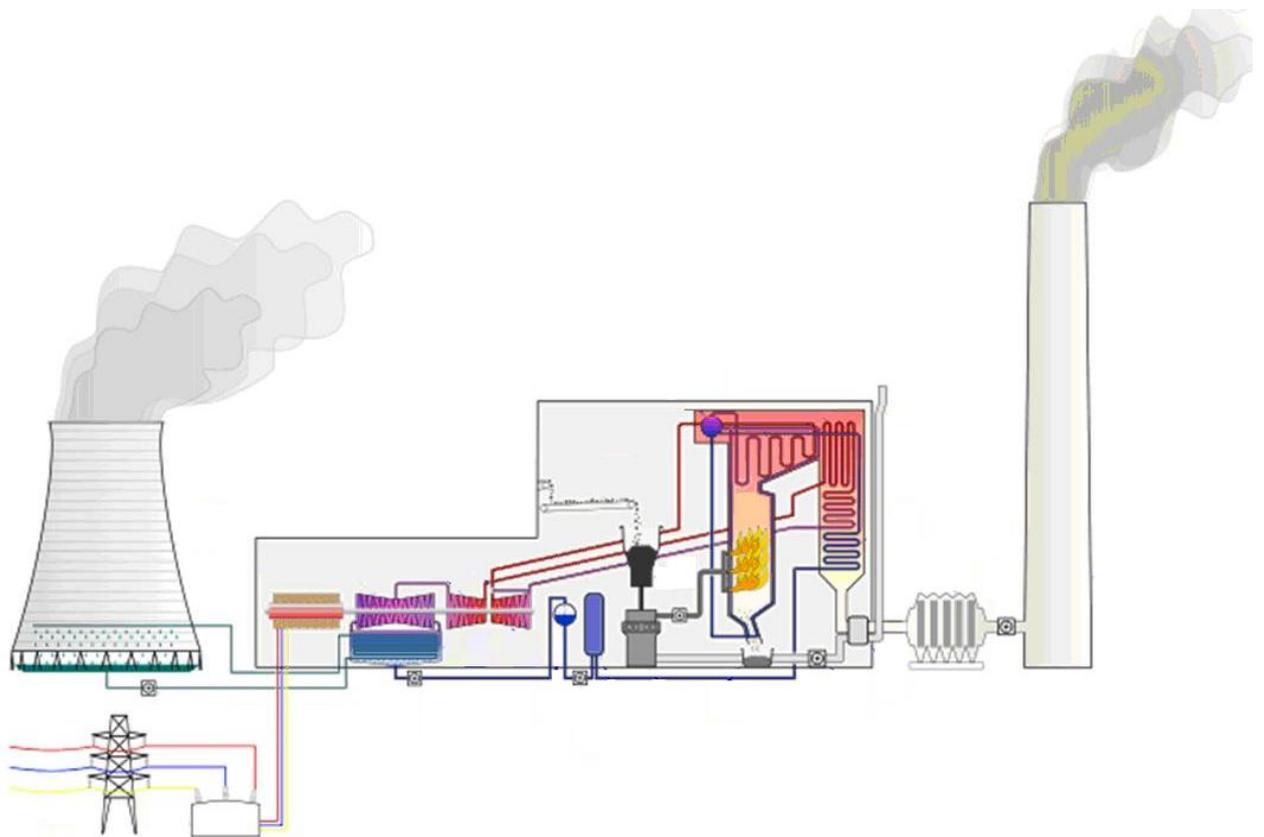


Рисунок 1.2 – Типовая тепловая схема угольной ТЭС во Вьетнаме.

Эффективность сжигания антрацитового угля в угольных печах Вьетнама часто ниже, чем эффективность сжигания битуминозного угля, который используется для сжигания в других странах. Это связано с тем, что вьетнамский уголь антрацит имеет низкое содержание летучих компонентов, высокое содержание связанного углерода, трудно воспламеняется и трудно выгорает, сжигается только в котлах с докритическими параметрами. Более того, в котлах с этой технологией содержание несгоревшего углерода в летучей золе по-прежнему остается высоким, что приводит к низкой эффективности выработки электроэнергии и повышенному расходу угля.

Технология сжигания угольной пыли используется на некоторых старых угольных электростанциях, построенных несколько десятилетий назад. Позднее тепловые электростанции начали использовать более современные технологии - котлы с циркулирующим кипящим слоем, типовая схема подобной технологии показана на рисунке 1.3.

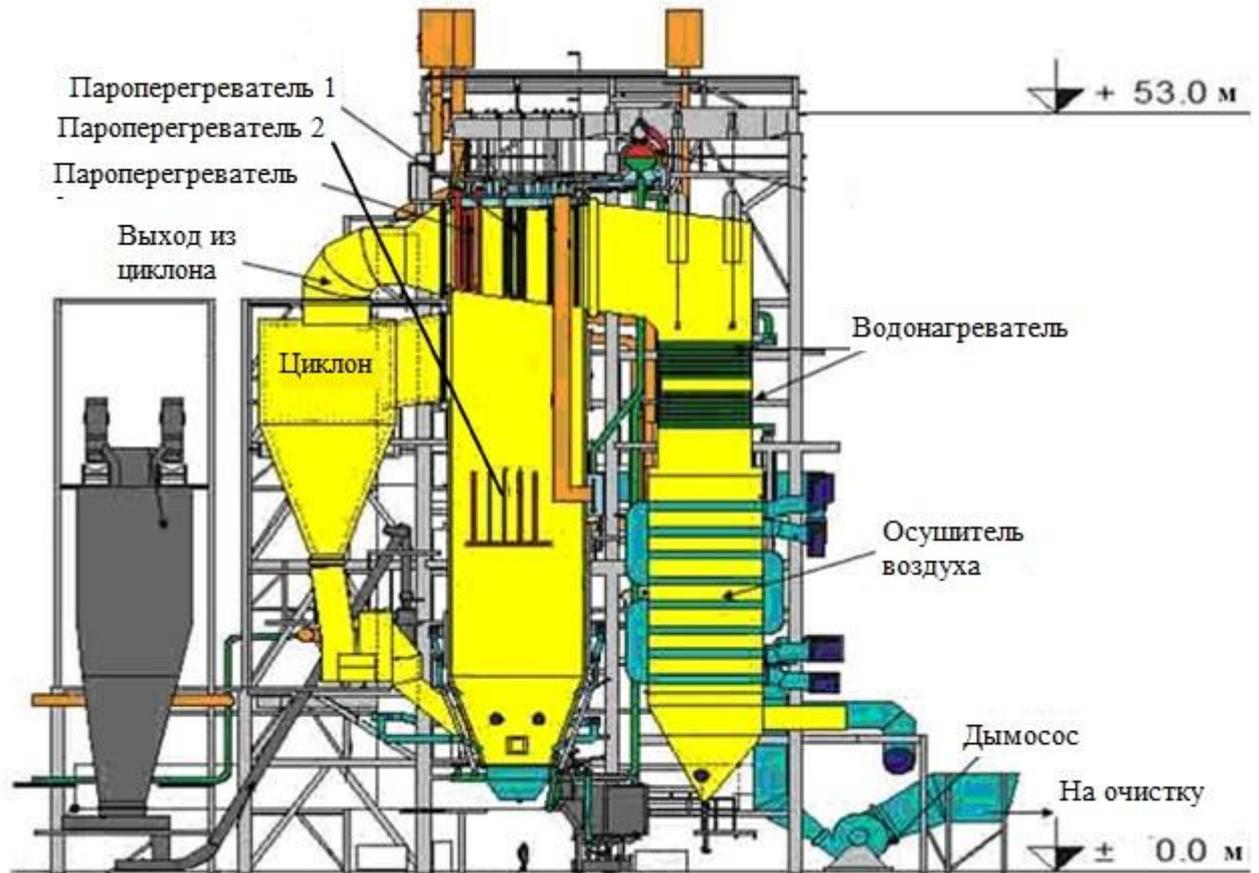


Рисунок 1.3 – Типовая схема котла с циркулирующим кипящим слоем

Котел с циркулирующим псевдоожиженным слоем отличается от печи, работающей на угольной пыли тем, что в процессе горения сжигается известняк с целью уменьшения образования диоксида серы, образующегося в процессе сжигания угля. Частицы угля горят во взвешенном состоянии благодаря пропусканию снизу вверх сжатого воздуха. Частицы угля заполняют объем камеры сгорания. Концентрация частиц угля уменьшается по высоте камеры сгорания. Циклон - это устройство, используемое для улавливания несгоревших частиц угля и возврата обратно в камеру сгорания для формирования рециркуляции. Горячие дымовые газы будут проходить через теплообменники в задней части печи, через систему пылеулавливания и выводиться через дымоход. По сравнению с пылеугольными котлами, котлы с ЦКС более сложны, работают в более тяжелых условиях (эрозия поверхностей нагрева запыленным потоком газа), имеют повышенный расход электроэнергии на привод высоконапорных вентиляторов для подачи воздуха в зону горения и создания кипящего слоя.

Основными преимуществами этой технологии сжигания твердого топлива являются:

1. Универсальность топочного устройства по топливу, позволяющая сжигать даже топливо с зольностью до 60%;
2. Низкотемпературное сжигание (850-900°C) в слое и ступенчатая подача воздуха позволяют получить более низкий уровень выбросов окислов азота;
3. Низкое содержание SO_2 за счет подачи сорбента - обычно известняка, при умеренном его расходе ($Ca/S = 2$). Связывание оксидов серы составляет – 90-95%;
4. Возможность достижения практически полного выгорания даже трудносжигаемых топлив (кокс и др.), благодаря многократной циркуляции золы и недогоревших частиц топлива;
5. Возможность устойчивой работы при низких нагрузках до 30 - 50%;
6. Возможность понижения температуры уходящих газов без риска сернокислотной коррозии поверхностей нагрева и газоходов. КПД котла при этом повышается до 95% и улучшается степень очистки газов в сепарационных устройствах;

7. Отказ от установок приготовления пыли повышает взрывобезопасность ТЭС и существенно сокращает затраты на ремонт, поскольку котел работает на измельченном твердом топливе.

В диссертации, в качестве примера, проведены экономические расчеты системы очистки дымовых газов ТЭС 1, г. Уонг Би, Вьетнам. Строительство этой теплоэлектростанции началось в 1961 году с помощью России, проектная мощность - 50 МВт.

Основной принцип работы:

Необработанный уголь измельчают в гранулы. Уголь измельчается в мелкие гранулы, затем через сепаратор порошкообразный уголь поступает в бункер для порошкового угля, а крупные частицы угля измельчаются в мельнице. Мелкодисперсный уголь сушат и кладут на 2 уровня, на каждом уровне располагается 4 форсунки с требуемым углом распыла, для обеспечения равномерной подачи тепла на все 4 стенки.

Горячий воздух, подаваемый в котел, всасывается вентилятором из окружающей среды через систему воздушного отопления. Дымовые газы, выходящие из камеры сгорания, используются для нагрева воды и поступающего воздуха. Затем дымовые газы проходят через электростатический пылевой фильтр и десульфуризатор. Далее, через дымосос выводится наружу.

Вода, подаваемая в котел, нагревается, проходя через аппараты высокого давления, затем в виде перегретого пара проходит через турбину, вращая генератор. Пар отбирается из турбины для обеспечения цикла отбора для нагрева питательной воды. Пар, выделяющийся в секции низкого давления турбины, подается в конденсатор и конденсируется в конденсат. Вода в конденсаторе прокачивается через нагреватель низкого давления и направляется на дегазацию в резервуар дегазации, а затем перекачивается в нагреватель высокого давления и подается в котел через водонагреватель для создания нового цикла.

Топливо, используемое для печи, включает в себя два основных компонента: уголь в виде порошка и мазут. Мазут используется при сжигании в печи, после того, как уголь сгорает, клапан, перекрывающий подачу мазута, закрывается. Кроме того, мазут используется в случае поломки, например, если угля недостаточно, может добавить мазут, для поддержания требуемой температуры в печи.

Система очистки дымовых газов:

Система очистки отходящих дымовых газов ТЭС включает водонагреватели, электростатические пылевые фильтры, системы очистки серы, вытяжные вентиляторы и дымовые трубы. Задача этой системы - снизить температуру и количество пыли в дымовых газах перед выбросом их в окружающую среду. Дымовые газы из топки содержат большое количество тепла и золы, образующейся при сжигании. Дымовой газ проходит через 2 осушителя воздуха, затем через водонагреватель и окончательный осушитель воздуха. Это приведет к значительному снижению температуры дымовых газов. Дымовые газы после их охлаждения поступают в систему пылеулавливания.

Система улавливания пыли, используемая на ТЭС в городе Уонг Би, представляет собой электростатический пылевой фильтр. Дымовой газ проходит через пространство между двумя электродами и ионизируется. Частицы оседают на катодных пластинах. Уловленные частицы сбрасывается в бункер ударными приспособлениями. Этот процесс протекает одновременно с отключением электроэнергии на полюсах электрофильтра и выполняется периодически. Падающие твердые частицы золы накапливаются в бункере до определенного уровня. После этого они отгружаются в транспорт с помощью системы клапанов.

Из дымовых газов, после их прохождения через проточную часть электростатического фильтра, извлекается большая часть твердых частиц. Затем они проходят через вытяжной вентилятор и поступают в систему очистки от серы. Дымовые газы являются продуктом сгорания угля, поэтому в них содержится очень токсичный газ SO_x . В системе очистки от серы дымовые газы реагируют с порошком $CaCO_3$, в результате чего образуется гипс $CaSO_4$, который

улавливается циклонами. Весь дымовой газ после выхода из системы очистки от серы является относительно чистым газом и направляется в дымоход.

Основные параметры котлов на ТЭС 1 г. Уонг Би.

Количество котлов: 4

- Тип: К-20-3;
- Страна происхождения: Россия;
- Производство пара: 110 т/ч;
- Давление пара: 100 кг/см²;
- Температура пара: 540⁰С;
- Температура подаваемой воды: 215⁰С;
- Угольный котел, с выгрузкой сухого шлака.

Воздуходувка:

- Расход: 123600 м³/ч;

Вентилятор для дымовых газов:

- Расход: 170000 м³/ч;

Основное топливо: антрацит.

Состав:

$C^{lv} = 61,01\%$	$W^{lv} = 10,72\%$
$H^{lv} = 1,30\%$	$A^{lv} = 28,0\%$
$O^{lv} = 1,1\%$	$V^{lv} = 2,52\%$
$N^{lv} = 0,4\%$	$Q_{lv}^t = 5256 \text{ ккал/кг}$
$S^{lv} = 0,91\%$	

Состав золы:

$SiO_2 = 58,52\%$	$Na_2O_3 < 0,10\%$
$Al_2O_2 = 28,08\%$	$K_2O = 2,62\%$
$Fe_2O_3 = 6,11\%$	$TiO_2 = 1,05\%$
$CaO = 0,82\%$	$MgO = 1,11\%$

Оставшееся содержание углерода в золе составляет от 15 до 20%.

Удельное сопротивление золы: около $11,4 \cdot 10^8 \div 1,4 \cdot 10^{12} \Omega \cdot \text{см}$ при 135⁰С.

Основные параметры дымовых газов проходящих через фильтр:

- Расход дымовых газов в одной печи: 198956 м³/час;
- Концентрация пыли в дымовых газах: 80 г/м³;
- Рабочая температура дымовых газов: 130⁰С;
- Максимальная рабочая температура дымовых газов: 250⁰С.

Электростатическая система улавливания пыли:

- Количество фильтров для улавливания пыли из дымовых газов: 4 комплекта (1 комплект для каждой печи);
- Тип пылесборника/Модель: FAA3*40.0m – 2*76.0-10.5;
- Производитель: ZHEJIANG FEIDA-Китай;
- Размер пылевого фильтра: длина: 20 м - ширина: 8 м.

1.2 Современное состояние исследований в области очистки газовых выбросов

За последние годы в области газоочистки опубликованы монографии и справочники следующих авторов: Колесник А.А., Войнов Н.А., Зиганшин М.Г., Ладыгичев М.Г., Швыдкий В.С., Бернер Г.Я. и др. В области сероочистки газов активно работают сотрудники ВНИИУС (г. Казань) (Масгаров А.М., Вильданов А.Ф. и др.), в области осушки и очистки газов от дисперсной фазы – ИВЦ «Инжехим» (Фарахов М.И., Лаптев А.Г., Башаров М.М. и др.). В настоящее время вопросам теории тонкого фильтрования во всем мире уделяется повышенное внимание. Исследуется специфика улавливания взвешенных в воздушной среде частиц в разных условиях с целью разработки новых фильтрующих материалов с заданными параметрами. Новое направление в решении актуальной проблемы совершенствования фильтрующих материалов связано с управляемым нанесением пористого проницаемого слоя нановолокон на более толстые, субмикронные (микронные) волокна [1]. Однако данный подход может увеличить стоимость фильтра и самой технологии.

Среди зарубежных и отечественных компаний, занимающихся

исследованием и внедрением в промышленность современного пылегазоочистного оборудования, стоит отметить: ОАО "НИИОГАЗ" (Россия), BWF TEC GmbH & Co. KG (Германия), GE WATER & PROCESS TECHNOLOGIES (США), и др. Известны разработки по очистке загрязненного воздуха системой механической и химической фильтрации (компания Ingersoll Rand, США). Однако стоимость таких комплексных систем очистки может достигать 2-3 тысяч долларов. В целом, анализ современного состояния исследований по данной проблеме показывает, что, несмотря на большое количество публикаций, ряд вопросов остается нерешенным.

На настоящий момент самыми распространенными аппаратами по очистке газовых потоков от твердых частиц, в частности от мелкодисперсных, являются инерционные пылеуловители (пылеосадительные камеры, циклоны и др.), электрофильтры и рукавные фильтры.

1.3 Инерционные пылеуловители

Инерционные пылеуловители являются распространенными аппаратами практически на всех предприятиях. Преимуществом этих пылеуловителей является простота устройства, легкость обслуживания и невысокая стоимость. К инерционным пылеуловителям относятся следующие аппараты: циклоны, батарейные циклоны, вихревые пылеуловители и др. [2-12].

Инерционные пылеуловители улавливают преимущественно крупные частицы размером до 20-30 мкм, их эффективность находится в пределах 60-99%. Точное значение эффективности зависит от многих факторов: дисперсности пыли, плотность пыли, скорости воздушного потока, конструкции устройства и др. Вследствие этого инерционные аппараты применяют обычно на предварительной стадии очистки, с последующим обеспылеванием газа в более совершенных аппаратах.

На рисунке 1.4 представлены различные модификации инерционных пылеуловителей. Широкое применение в металлургии нашли «пылевые мешки».

Например, использование которых за котлом, обеспечивает очистку газового потока от частиц более 30 мкм эффективностью до 65-80 % (рис. 1.4, *а*). В данном устройстве цилиндрическая труба придает частицам дополнительно к гравитационной силе момент, равный примерно $g/3$.

Пылеуловитель, представленный на рисунке. 1.4, *б*, встраивается в газоходы диаметром более 2 м. Выпадение крупных частиц из газового потока в бункер происходит за счет изменения направления газа от прямолинейного движения.

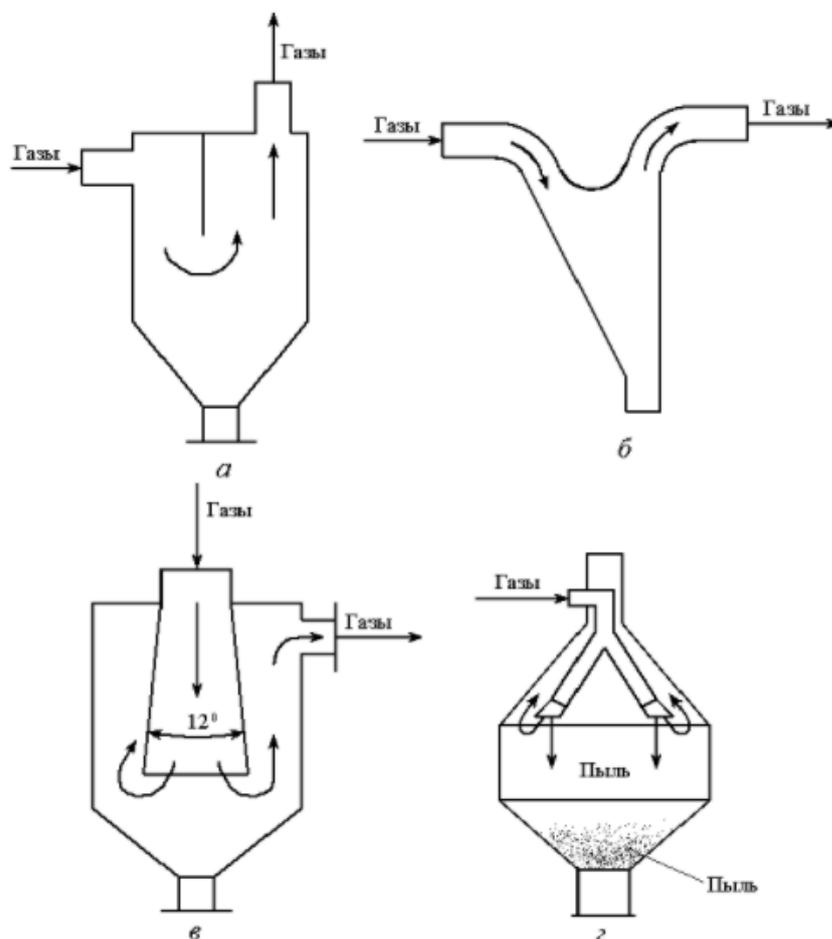


Рисунок 1.4 – Инерционные пылеуловители: *а* – камера с перегородкой; *б* – камера с плавным поворотом газового потока; *в* – камера с расширяющимся конусом; *г* – камеры с заглубленным бункером.

В камере с расширяющим конусом, как и в «пылевых мешках», твердые частицы испытывают на себе дополнительное усилие, которое обеспечивает дополнительное ускорение $g/3$ (рис. 1.4, *в*). Эффективность таких

аппаратов достигает до 50 – 80 %, преимущественно в зависимости от скорости газового потока на входе [13-29].

Для предварительной очистки газового потока от частиц более 20 мкм широкое применение нашли пылеуловители жалюзийного типа (рис. 1.5). В данных аппаратах до 90 % газового потока частично очищается от твердых частиц при прохождении через жалюзи. Рекомендуемая скорость газов на входе в пылеуловитель жалюзийного типа 12 – 15 м/с. Гидравлическое сопротивление решетки 100 – 500 Па. К недостаткам таких устройств относится частый износ пластин решетки при высоких концентрациях пыли в газовых потоках. При охлаждении газов до точки росы существует возможность образования отложений.

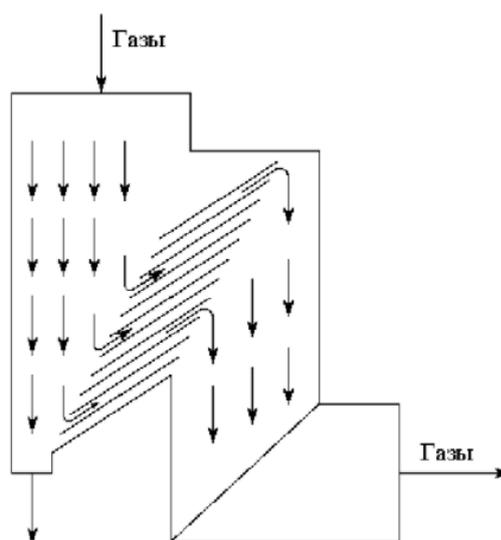


Рисунок 1.5 – Инерционный пылеуловитель жалюзийного типа

Для повышения эффективности улавливания частиц используют различные конструкции узлов в пылеуловителях (рис. 1.6). В конструкции, представленной на рисунке 1.6, *а* в кольцевой зазор подается воздух с большей скоростью, чем осевая скорость основного потока. При вступлении в контакт дополнительного подаваемого воздуха с основным газовым потоком происходит дополнительное закручивание потока, что повышает сепарацию газа от частиц. В более простой конструкции, но менее эффективной, часть отходящих газов уходит через щели в кольцевой муфте без дополнительной подачи воздуха (рис. 1.6, *б*).

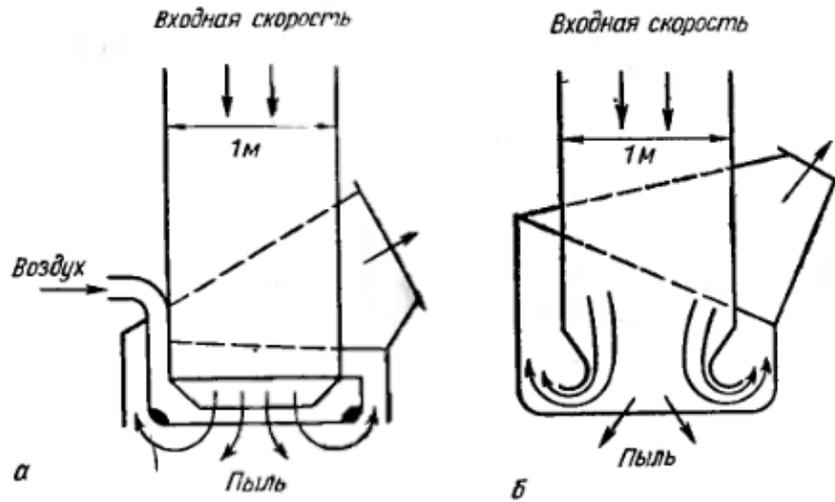


Рисунок 1.6 – Инерционные пылеуловители с различной конструкцией узлов:
а - конструкция с дополнительной подачей воздуха; *б* - конструкция без
 дополнительной подачи воздуха

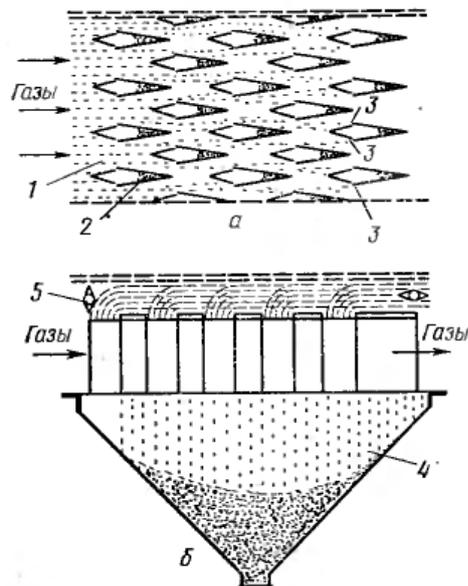


Рисунок 1.7 – Инерционный пылеуловитель с V-образными отражательными
 перегородками: *а* – вид сверху; *б* – вид спереди;

1 – каналы, *2* – перегородки; *3* – щелевое отверстие; *4* – бункер; *5* – заслонки

По мере необходимости повышения эффективности улавливания твердых частиц из газовых потоков очистительные аппараты усложняют

дополнительными элементами. На рисунке 1.7 представлено устройство, которое относится к инерционным пылеуловителям, сложной конструкции.

Запыленный газовый поток проходит через каналы *1*, которые образуются вследствие установки в газовом тракте *V* – образных перегородок *2*. При прохождении газового потока по каналам *1* происходит возрастание скорости газа, что в свою очередь приводит к концентрации частиц у стенок перегородок, установленных на выходе из каналов. Часть газов с высокими концентрациями твердых частиц проходит через щелевые отверстия *3* и затем удаляется через верхние каналы, образованные двумя *V* – образными перегородками. Твердые частицы осаждаются в бункере *4*. Заслонки *5* выполняют функцию клапанов: регулируют количество газов, которые отводятся через образованные перегородками каналы.

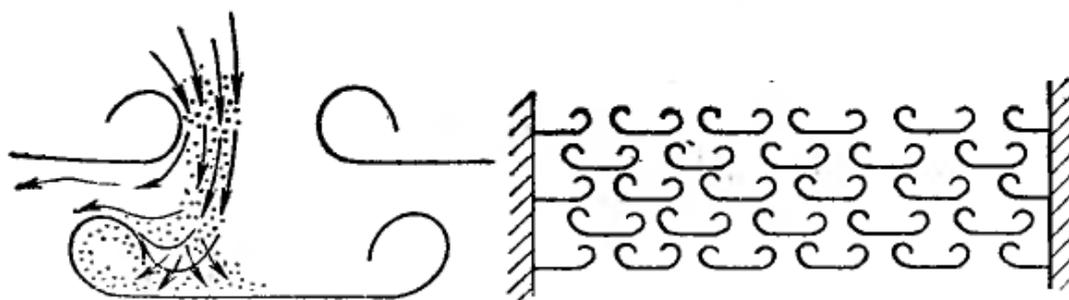


Рисунок 1.8 – Экранный инерционный пылеуловитель

К более сложным инерционным пылеуловителям относят экранный инерционный пылеуловитель (рис. 1.8). Основным его преимуществом является низкое гидравлическое сопротивление, возможность использования при высоких температурах и агрессивных средах. При непосредственном контакте пылегазового потока с ячейками *V*-образных элементов, частицы пыли отделяется от газового потока и оседают на дно аппарата. Остальная часть частиц газового потока при движении по кругу вдоль кривой отбрасывается к стенкам ячеек. В результате данные частицы также отделяются от многофазного потока и попадают в бункер.

К наиболее распространенным очистительным устройствам среди всех очистительных аппаратов относятся циклоны. На рисунке 1.9 представлена одна из модификаций циклонов - цилиндрический циклон. Газовый поток входит в циклон через входной патрубок 1, за счет действия центробежных сил частицы пыли отбрасываются на стенки корпуса и выпадают из потока. Очищенный газ выходит из циклона через выходной патрубок 2.

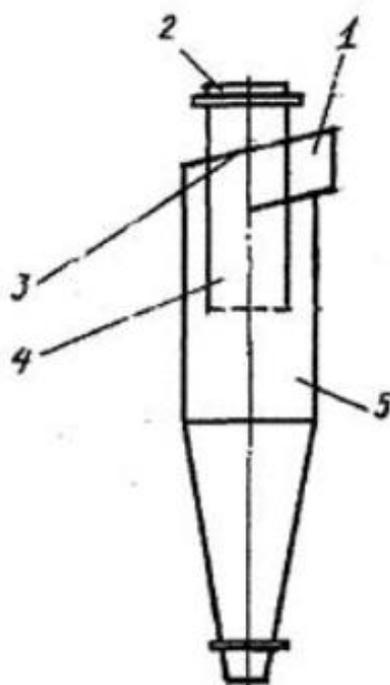


Рисунок 1.9 – Конструктивная схема цилиндрического циклона:

1 – входной патрубок; 2 – выходной патрубок; 3 – винтообразная крышка;
4 – выхлопная труба; 5 – корпус циклона

К достоинствам использования циклонов относят: дешевизна, простота использования, высокая производительность, отсутствие движущихся частей. Главными недостатками использования циклонов является высокое гидравлическое сопротивление 1250 – 1500 Па и низкая эффективность улавливания частиц размером менее 10 – 20 мкм. В реальных условиях для повышения эффективности очистки газового потока от мелкодисперсной пыли

используют батарейные циклоны. Батарейный циклон – это аппарат, состоящий из несколько параллельно включенных циклонов.

Недостатком использования батарейных циклонов является то, что из-за малых размеров отдельных элементов батареи, они быстро изнашиваются. Также такие устройства металлоемкие и занимают значительные производственные площади.

На тепловых электрических станция, где необходимо очищать газовые выбросы от твердых частиц инерционные пылеуловители используются преимущественно в качестве первой ступени очистки газовых потоков [30-40].

1.4 Электроосаждение

Для очистки многофазных газовых потоков от частиц пыли при электроосаждении используются электрические силы.

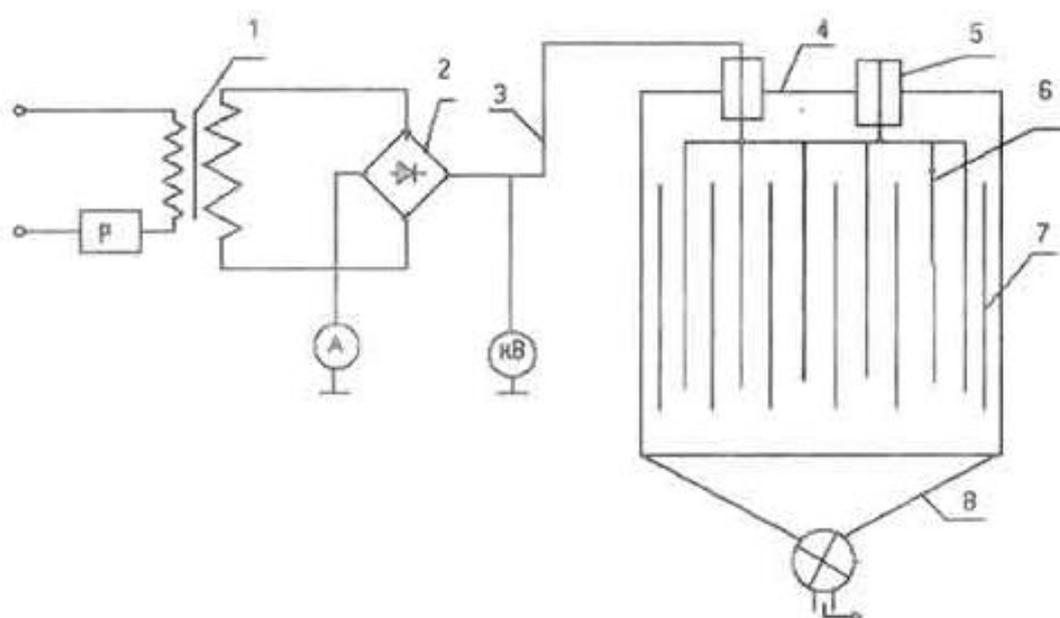


Рисунок 1.10 – Принципиальная схема установки электрической очистки газов

- 1 – повысительный трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – токоподвод;
 4 – корпус электрофильтра; 5 – изолятор; 6 – коронирующий электрод;
 7 – осадительный электрод; 8 – бункер; P – регулятор напряжения;
 A – амперметр; кВ – киловольтметр

На рисунке 1.10 представлена принципиальная схема установки электрической очистки газов.

Электрический фильтр представляет собой корпус, который выполнен из железобетона, кирпичной кладки или металла. Внутри корпуса расположены осадительные и коронирующие электроды. Осадительные электроды выполнены из пластин специального профиля, которые закрепляются на балках подвеса и электрически соединены с корпусом. Коронирующие электроды подвешиваются на опорно-проходных изоляторах и размещаются по осевой линии между осадительными электродами. Для удаления пыли с электродов в электрофильтрах применяются механические, электрические, электропневматические и другие устройства. Для сбора уловленной с электродов пыли электрофильтр снабжен бункерами. На входе и выходе его имеются устройства для равномерного распределения пылегазового потока по сечению.

Процесс очистки многофазного газового потока в электростатическом фильтре можно описать следующим образом: газовая среда входит в пространство между электродами, затем отрицательно заряженные ионы в ходе своего движения под действием электрического поля направляются от коронирующих электродов к осадительным. Стоит отметить, что в ходе данного процесса часть ионов оседает на твердых частицах, приобретая отрицательный заряд. Заряженные твердые частицы начинают двигаться к осадительному электроду и осаждаются на нем [41-50].

Скорость движения частиц пыли по направлению к осадительному электроду является скоростью дрейфа. В практике очистки промышленных газов используется термин - эффективная скорость дрейфа, которая примерно в два раза ниже скорости дрейфа. Это связано с тем, что данный термин учитывает параметры, которые ухудшают эффективность пылегазоочистки.

В мокрых электрофильтрах уловленные жидкие частицы стекают вниз. В сухих аппаратах, накопленный на осадительных электродах слой, периодически удаляется с помощью механизмов встряхивания. Отделившиеся от электродов агломераты пыли под действием силы тяжести падают в бункер, откуда

удаляются с помощью специальных устройств и направляются для дальнейшего использования или в места хранения отходов.

Таким образом, можно заключить, что электрофильтры являются высокоэффективными аппаратами для очистки газов от мелкодисперсных частиц размером менее 1 мкм. Основная сложность их использования заключается в быстром загрязнении осадительного электрода [51-60].

1.5 Рукавные фильтры

Рукавные фильтры - надежные и эффективные пылеулавливающие аппараты, предназначенные для сухой очистки промышленных газов. Рукавный фильтр представляет собой металлический корпус, разделенный перегородками на секции, в каждой из которых размещена группа фильтрующих рукавов, подвешенных на опорных решетках. Внизу рукавного фильтра находится бункер для сбора пыли, выгрузку пыли и герметичность обеспечивают шнек и шлюзовой питатель (рис.1.8). Регенерация (очистка) рукавов фильтра происходит поочередно кратковременными импульсами сжатого воздуха. Управление регенерацией осуществляет контроллер, который задает частоту, и продолжительность импульсов по перепаду давления при помощи дифманометра [61-72].

Фильтрующим элементом рукавных фильтров является фильтровальные рукава, сшитые из фильтрующего материала, который подбирается в зависимости от условий эксплуатации и состава пыли. Рукавные фильтры применяются для очистки промышленных газов от пыли при концентрации до 60 г/м^3 . Однако при применении специальных устройств, понижающих входную концентрацию пыли, рукавным фильтрам по силам противостоять концентрации до 200 г/м^3 . После рукавного фильтра очищенный воздух может содержать менее 10 мг/м^3 пыли.

Рукавные фильтры чаще применяются при температуре очищаемого газа, в диапазоне температур $20\text{-}260^\circ\text{C}$, но также существуют материалы, рассчитанные на работу при температуре до 350°C .

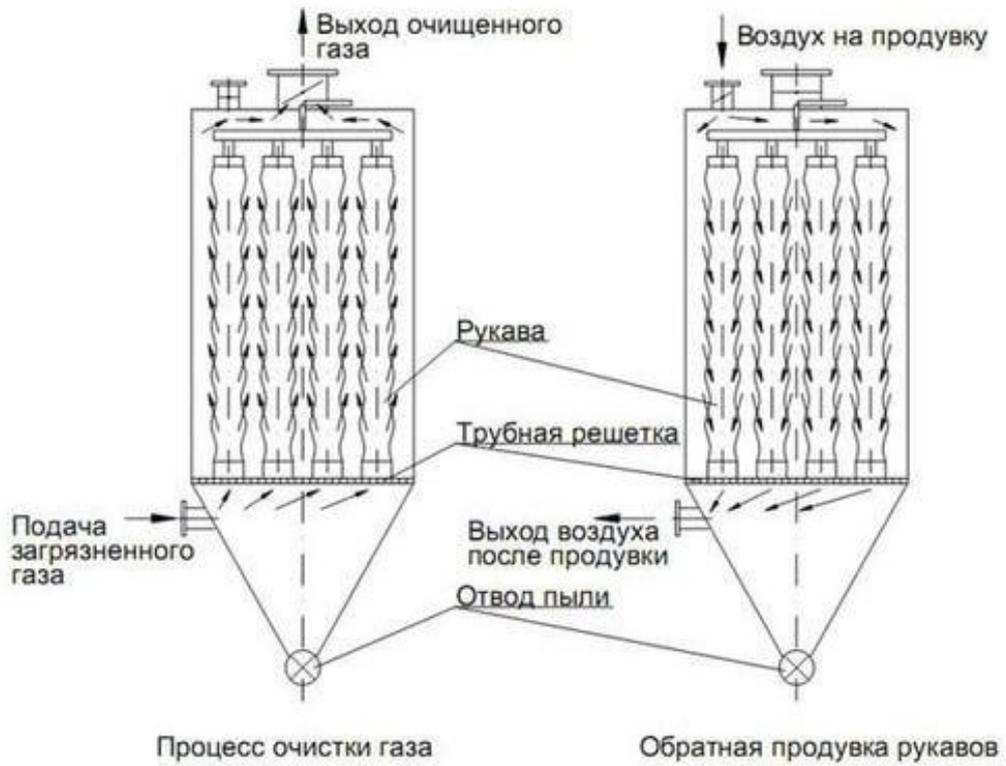


Рисунок 1.11 – Рукавной фильтр

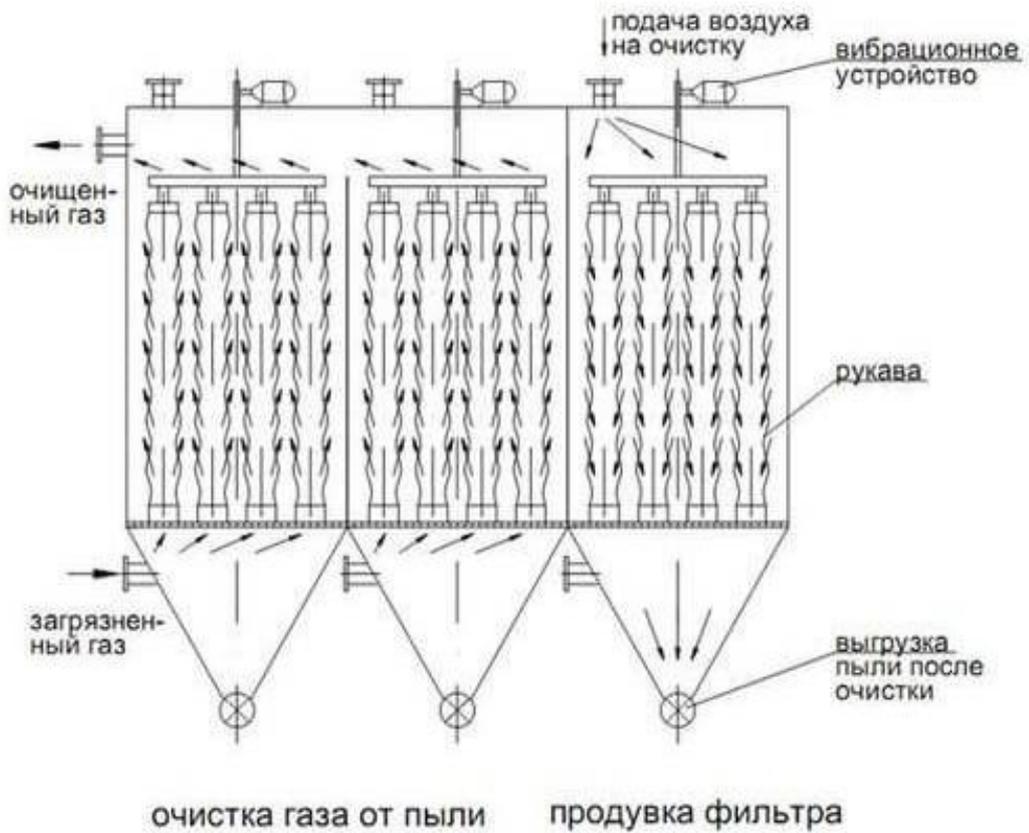


Рисунок 1.12 – Батарея рукавных фильтров

В зависимости от гранулометрического состава пыли и начальной запыленности степень очистки (КПД) может составлять 99,9 %. Очистка рукавов фильтра производится путем их встряхивания, с помощью импульсов сжатого воздуха.

Для повышения эффективности очистки газовых выбросов используются батареи рукавных фильтров (рис. 1.12).

К основным недостаткам рукавных фильтров относятся: высокие энергетические затраты в связи с повышенным гидравлическим сопротивлением 1000 – 1500 Па, необходимость частой замены фильтрующего материала высокой стоимости, металлоемкость, сложность конструкции, громоздкость [73-80].

1.6 Оценка литературного обзора

На настоящий момент времени очистка газовых выбросов от различных частиц на предприятиях осуществляется большим разнообразием аппаратов: инерционные пылеуловители, циклоны, батарейные циклоны, электростатические фильтры, мокрые аппараты, рукавные фильтры и др. Выбор аппаратов для очистки газовых выбросов от твердых частиц зависит от большого количества факторов: требуемая степень очистки, теплофизические, электростатические и абразивные свойства частиц и др. Следует отметить, что зачастую выбор аппаратов для очистки воздуха зависит от экономических возможностей предприятия. Поэтому большинство предприятий используют относительно не дорогие аппараты, к которым относятся различные модификации осадительных камер, циклонов и др. Преимуществами таких аппаратов являются простота действия, отсутствие механизмов, дешевизна и др. Однако, одним из главных недостатков является низкая степень очистки газовых выбросов от частиц размером до 10 мкм, которая составляет ниже 5 – 10 %. Увеличение степени очистки газовых выбросов достигается организацией технологической линии очистки газовых выбросов от твердых частиц, что требует существенных экономических вложений. Как правило, такая линия состоит из нескольких

аппаратов грубой очистки: пылесадительные камеры и циклоны, которая позволяет высокоэффективно очистить газовые выбросы от частиц размером более 10 мкм и после них устанавливается один экземпляр более дорогого и сложного аппарата: рукавной фильтр или электростатический фильтр, позволяющий произвести конечную очистку газовых выбросов от мелкодисперсных частиц размером менее 10 мкм с эффективностью очистки более 95 %. Данная схема достаточно хорошо реализуется на предприятиях. Однако быстрое загрязнение рукавных или электростатических фильтров приводит к существенному снижению степени очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц размером до 10 мкм. Для решения данной проблемы необходима более частая замена дорогостоящих фильтрующих элементов рукавных фильтров или очистка электростатических фильтров, что является неблагоприятным фактором для предприятий. Следует отметить, что установка рукавного фильтра примерно в 1,5 – 2 раза дешевле, чем электрофильтра, но эксплуатация дороже. Особенно это касается малых предприятий, на которых частая замена фильтрующих элементов является сложно реализуемым мероприятием в материальном отношении, так как при замене фильтрующих элементов или очистке аппаратов производственный процесс останавливается. В результате мелкодисперсные частицы размером до 10 мкм практически в полном объеме после технологических циклов попадают в окружающую среду. В связи с этим разработка и создание новых технологических решений, способных повысить степень очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц размером менее 10 мкм является актуальной [81-107].

1.7 Современные технологии очистки газов на ТЭС

В статье [108] рассмотрена проблема улавливания мелкодисперсных частиц из дымовых газов на угольных электростанциях (рис.1.13). Мелкие частицы являются основными источниками загрязнения окружающей среды и, в основном, их выброс осуществляется угольными электростанциями. Попадая в атмосферу,

мелкие частицы оказывают вредное влияние на здоровье человека, так как они попадают непосредственно в дыхательные пути. Выбросы мелких частиц с угольных электростанций могут привести к возникновению множества экологических проблем. Для решения этой проблемы на угольных электростанциях существуют множество различных методов для уменьшения выбросов мелких частиц, таких как: электростатическое осаждение частиц, влажное электростатическое осаждение, скрубберы и др. Однако данные методы являются менее эффективными для улавливания мелких частиц в диапазоне от 0,1 до 1,0 мкм. Это происходит вследствие того, что мелкие частицы данного диапазона слабо подвержены воздействию инерционных и диффузионных сил. Тем не менее, эффективность удаления мелких частиц может быть повышена, если их размер увеличить за счет физических или химических агломерационных методов предварительной обработки. Среди существующих методов улавливания частиц, гетерогенная конденсация водяного пара является одной из наиболее перспективных технологий предварительной обработки из-за ее простоты проведения и возможности ее сочетания с уже работающими устройствами улавливания твердых частиц на угольных электростанциях.

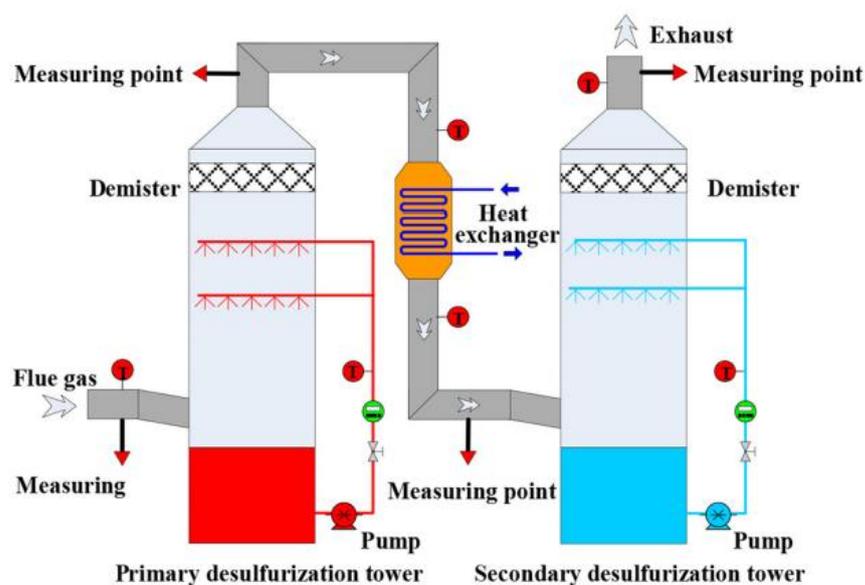


Рисунок 1.13 – Технологическая схема каскадной системы «WFGD» - Влажная десульфуризация дымовых газов

Авторами было установлено, что эффективный процесс удаления мелких частиц может происходить за счет гетерогенной конденсации водяного пара. Однако реализация данного метода на практике затруднительна, так как применение возможно только для дымоходов способных работать с высокими значениями влажности газа. Мелкие частицы сталкиваются между собой и соединяются в более крупные капли за счет гетерогенной конденсации пара, а затем эффективно удаляется через влажный электростатический фильтр расположенный ниже. Также авторами был предложен метод, который подразумевал одновременное использование акустической агломерации и конденсации перенасыщенного водяного пара для удаления мелкодисперсных частиц в системе мокрой очистки дымовых газов. Однако эта технология имеет низкую эффективность агломерации, а при работе возникает высокий уровень шума. Другой метод представлял собой использование системы трубок с частичной циркуляцией газа, где при добавлении горячей воды к охлажденному насыщенному пару получалось перенасыщенная среда водяного пара, что способствовало столкновению и увеличению размеров мелкодисперсных частиц. Данный способ показал достаточно высокую эффективность удаления мелкодисперсных частиц из газовых выбросов, однако в виду своей сложной конструкции он не нашел широкого применения на ТЭС, ТЭЦ и др. Следовательно, разработка более простого и практичного подхода для улучшения возможности гетерогенной конденсации водяного пара для удаления мелких частиц на электростанциях является важной и актуальной задачей.

В другой работе исследовался процесс, способствующий эффективному удалению мелких частиц в специальной каскадной системе WFGD (Влажное десульфуризация дымовых газов) при гетерогенном водяном паре. Влажная десульфуризация дымовых газов на угольных электростанциях получила наиболее широкое применение благодаря своей высокой эффективности удаления SO_2 , надежности и низкому энергопотреблению. Был установлен конденсирующий теплообменник между двумя колоннами обессеривания для возможности регулирования требуемой степени перенасыщения. Возможность

этого процесса была проанализирована путем сравнения теоретических степеней перенасыщения водяного пара и критической степени перенасыщенности мелких частиц. Представленная экспериментальная установка состояла из котла, реактора селективного каталитического восстановления, электрофилтра и каскадной системой WFGD (Влажное десульфуризация дымовых газов).

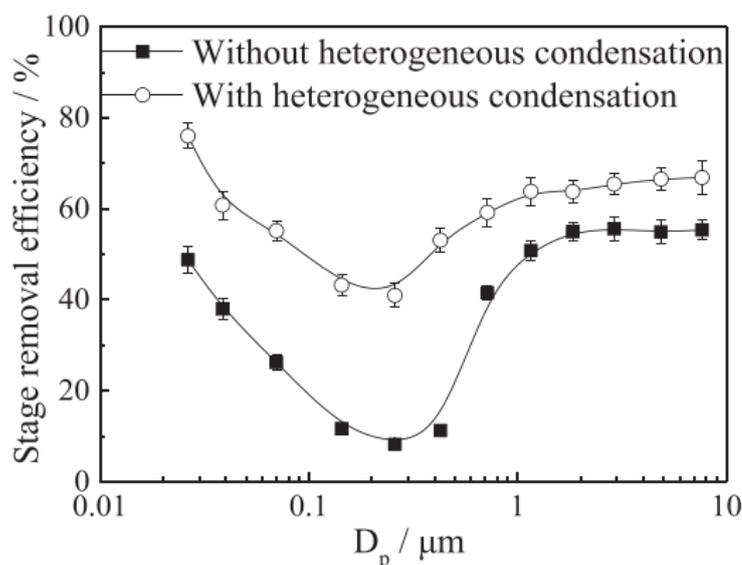


Рисунок 1.14 – График зависимости эффективности удаления мелкодисперсных частиц различных размеров без применения гетерогенной конденсации водяного пара и с ее применением.

Результаты исследования показали, что в нормальных условиях общая эффективность удаления мелкодисперсных частиц каскадной WFGD-системы может быть увеличена приблизительно с 44,4% до 63,9%. В этом процессе падение температуры дымовых газов в теплообменнике играет важную роль. Общая эффективность удаления и скорость уменьшения количества мелких частиц из газовых выбросов могут быть значительно увеличены за счет увеличения перепада температуры. Наиболее подходящий перепад температуры составляет от 3 до 5°C. Кроме того, перенасыщенная среда водяного пара может быть снова создана во вторичной колонне при более высоких соотношениях жидкость-газ, что положительно влияет на удаление мелких частиц. В

большинстве случаев этот процесс будет способствовать удалению мелких частиц, при этом общая эффективность улавливания повышается на 15-20%, а выбросы мелких частиц сокращаются на 30-40% (рис.1.14).

Для эффективного удаления мелкодисперсных частиц из дымовых газов, при сжигании угля, предложен способ, включающий каскадную систему влажной десульфуризации дымовых газов, основанную на гетерогенной конденсации водяного пара путем снижения температуры дымовых газов между двумя десульфурационными аппаратами. В стационарной перенасыщенной среде водяного пара мелкие частицы могут превратиться в конденсационные капли, а затем эффективно удаляться в последующем втором аппарате. Результаты численного анализа этого процесса показали, что он осуществим в большинстве случаев, а экспериментальные результаты доказали, что эффективность удаления мелких частиц во всех диапазонах размеров может быть значительно увеличена. Кроме того, также было изучено влияние некоторых ключевых рабочих параметров, и результаты показали, что общая эффективность улавливания будет увеличена на 15-20%, а эмиссия мелких частиц (выброс в атмосферу газов и других побочных продуктов сгорания топлива, которые могут быть причиной вредного воздействия на окружающую среду), в большинстве случаев, может быть снижена на 30-40%.

В работе [109] также рассмотрена проблема по улавливанию частиц из дымовых газов и предложен способ установки охлаждающего теплообменника. Угольные котлы, как правило, оснащаются значительным количеством оборудованием для контроля загрязняющих веществ с учетом определенных стандартов охраны окружающей среды, что приводит к постоянному увеличению эксплуатационных расходов и снижению производительности угольных ресурсов. Синергетическое улавливание загрязняющих веществ может быть потенциальным решением проблемы. В данной работе предложен способ установки охлаждающего теплообменника на выходе мокрого скруббера очистки дымовых газов для рекуперации отходящего тепла (возвращение части энергии для повторного использования) и улавливания мелкодисперсных частиц. Процесс

охлаждения в этом методе использует влажный газ, что указывает на то, что эта работа отличается от предыдущих соответствующих работ, которые основаны на сухом осаждении. С помощью экспериментов были исследованы соответствующие механизмы работы теплообменника на основе мокрого осаждения. Кроме того, конденсированная вода важна для процесса очистки, так как она может снизить объем загрязнения. Анализ влияния перепада температуры дымовых газов, площади поверхности осаждения, начальной концентрации частиц и расхода дымовых газов также рассматривается в данной работе для обеспечения требуемой степени очистки. В работе также рассматривалась техническая возможность и экономическая оценка данного метода, с помощью которой предлагаются возможные меры по его совершенствованию. Кроме того, представлен применимый режим рекуперации тепла и синергетического улавливания частиц, а также оценена приемлемая экономическая эффективность.

В этой работе была создана экспериментальная модель. Эта модель включала в себя секции генерации дымовых газов, увлажнения и охлаждения. Экспериментальная установка представлена на рисунке 1.15.

Для исследования экспериментальной модели уголь не был выбран в качестве топлива из-за нестабильности процесса горения. Был использован искусственно созданный дымовой газ. Дымовой газ сначала охлаждали до 60°C , а затем передавали на последующее оборудование после повышения давления в вытяжном вентиляторе. В секции увлажнения скруббер был оборудован многослойными распылителями для обеспечения требуемой степени насыщения дымового газа. Циркуляционная вода в скруббере нагревалась до температуры насыщения во внешнем водяном баке. На выходе из скруббера был установлен вихревой влагоуловитель для предотвращения попадания капель воды в дымовой газ. В секции охлаждения насыщенный влажный дымовой газ с мелкими частицами проходил через теплообменник, а затем выводился из него. Теплообменник состоял из трех групп пучков, обозначенных как I, II и III. Каждая группа обрабатывала одну и ту же область. Под каждой группой были установлены контейнеры для сбора конденсированной воды. Четыре точки

измерения (a, b, c и d) были установлены последовательно от входа до выхода теплообменника, которые можно было использовать для измерения температуры дымовых газов, влажности, скорости потока и распределения частиц по размерам.

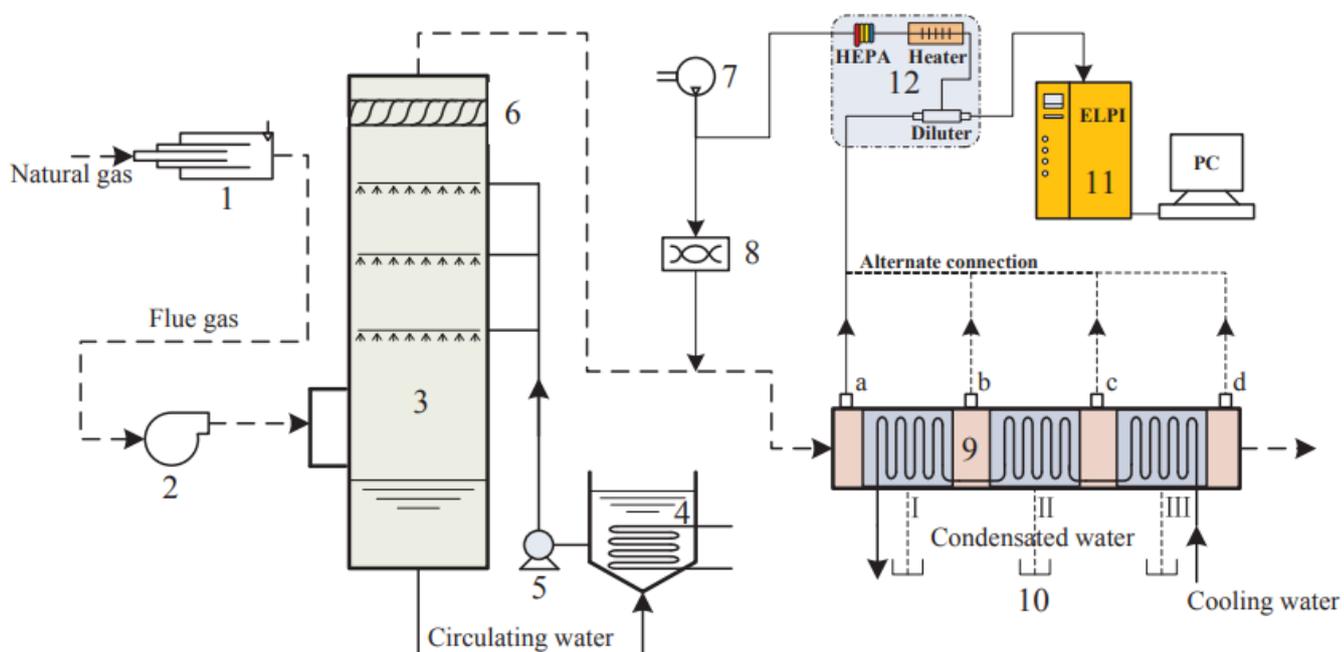


Рисунок 1.15 – Экспериментальная установка: 2 – камера сгорания, 3 – вытяжной вентилятор, 4 – скруббер, 5 – бак для воды с электрическим подогревом, 6 – циркуляционный водяной насос, 7 – ротационный влагоотделитель, 8 – воздушный компрессор, 9 – генератор аэрозолей, 10 – трубчатый теплообменник, 11 – контейнер, 12 – устройство для электрического осаждения низкого давления (ELPI), система Diluter a, b, c, d: точки измерения.

Исследование проводилось при разных условиях, где температура устанавливалась до 12°C, 34°C и 40°C. Распределение частиц по размерам в точках a и d контролировали с помощью устройства ELPI. Эффективность улавливания фракций частиц представлена на рисунке 1.16.

Эффективность улавливания частиц повышается с увеличением перепадов температуры. Это явление указывает на то, что факторы многократного увеличения эффективности могут способствовать захвату частиц, когда перепад температуры становится большим. Эффективность улавливания мелких частиц

составляла от 32,5% до 62,5%, а общая эффективность улавливания была выше 53% при перепаде температуры 40°C, тем самым подтверждая высокую эффективность улавливания мелких частиц за счет охлаждения и конденсации в процессе рекуперации тепла влажных дымовых газов. В этом методе зона захвата является важным фактором, влияющим на эффективность захвата частиц. Метод подходит для случаев с низкой начальной концентрацией частиц. Частицы сталкиваются с поверхностью трубок, что приводит к увеличению эффективности улавливания частиц. В ходе исследований было выявлено, что с увеличением начальной концентрации частиц снижается эффективность их улавливания из дымовых газов. Если частицы двигаются под действием диффузиофоретических и термофоретических сил, они склонны оседать на поверхность труб при снижении скорости потока дымового газа, что приводит к повышению эффективности улавливания мелкодисперсных частиц.

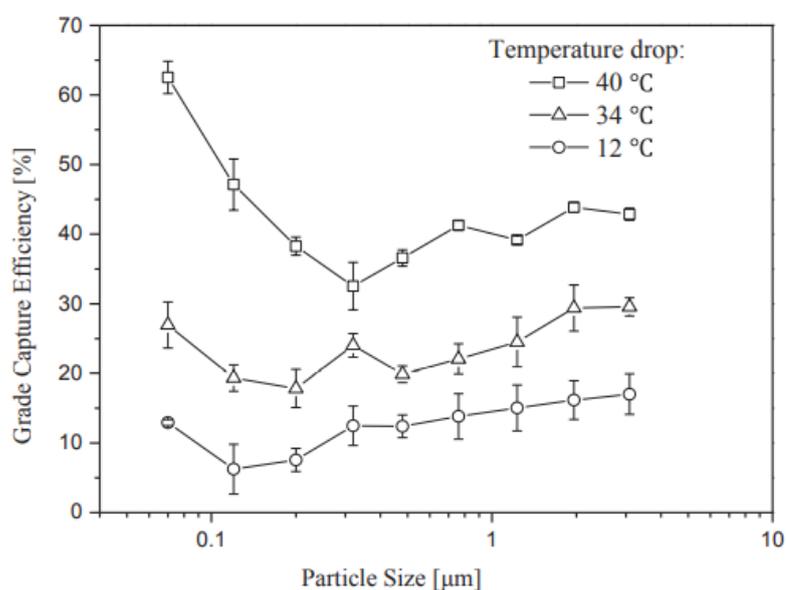


Рисунок 1.16 – График зависимости эффективности улавливания частиц от их размеров при разных значениях температуры.

В статье [110] был смоделирован процесс улавливания частиц из дымовых газов в программном комплексе ANSYS Fluent. Учитывая очевидное различие между сухим и влажным осаждением, была разработана оригинальная

упрощенная модель, подходящая для процесса удаления частиц в конденсационном теплообменнике. Для проверки этой упрощенной модели были проведены лабораторные эксперименты. Численные результаты хорошо согласуются с экспериментальными измерениями, а максимальная погрешность проведения опыта находится в пределах 8%. С помощью CFD-моделирования было проанализировано влияние размера частиц на процесс их улавливания. Полученные результаты показали, что эффективность удаления, скорость роста среднего диаметра и доля выращиваемых частиц увеличиваются с уменьшением угла контакта. Однако повышение эффективности удаления ограничено, когда угол контакта был достаточно мал.

Электростанция, работающая на угле, является одним из основных источников загрязнения окружающей среды мелкодисперсными частицами, и эффективное удаление мелких частиц из дымовых газов стало новым требованием правительства Китая в отношении выбросов твердых частиц (10 мг/м^3 , 2020 г.). Конденсационный теплообменник представляет собой практическую технологию утилизации отработанного тепла и воды из дымовых газов. Это может дополнительно улучшить тепловой КПД котла и снизить потребление воды на угольных электростанциях. Из-за конденсации дымовых газов конденсационный теплообменник имеет синергетический эффект для удаления мелких частиц и может рассматриваться как технология очистки от мелкодисперсных частиц (рис. 1.17). Однако условия эксплуатации угольных агрегатов различаются, что влияет на эффективность удаления частиц в конденсационном теплообменнике. Кроме того, эффективность удаления частиц и гранулометрический состав на выходе из конденсирующего теплообменника определяют конструкцию системы удаления пыли с другими технологиями разделения или без них, и тип оборудования для удаления пыли (например, туманоуловитель и мокрый электростатический осадитель). Следовательно, численные модели, описывающие механизмы осаждения, необходимы для прогнозирования характеристик удаления частиц в конденсационном теплообменнике.

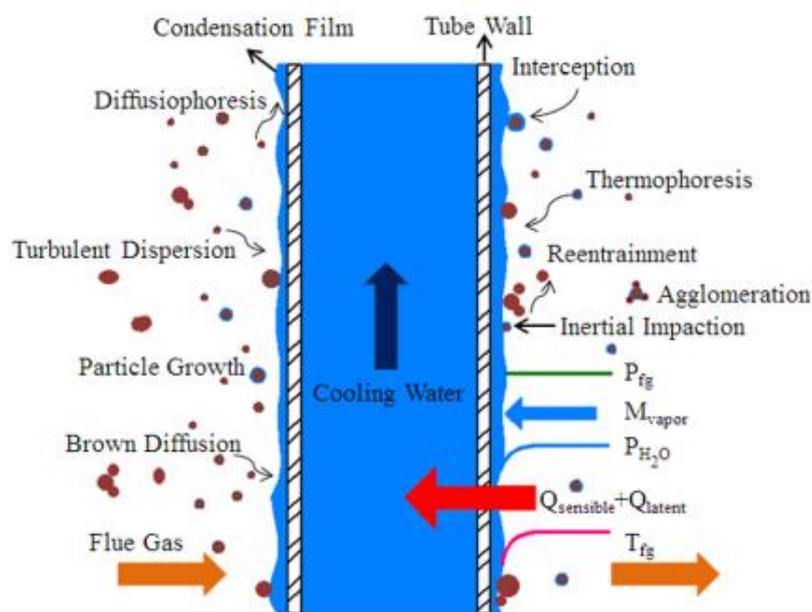


Рисунок 1.17 – Мелкодисперсные частицы в конденсационном теплообменнике: процесс удаления

Было выполнено много численных расчетов осаждения частиц в теплообменниках. Авторы численно и экспериментально изучили влияние размера частиц на их осаждение в компактных теплообменниках. Дискретная модель частиц (DPM) использовалась для моделирования движения частиц, а осаждение определялось соотношением нормальных, тангенциальных сил качения и скольжения. Результаты показали, что осаждение частиц для различных размеров частиц (от 1 мкм до 4 мм) может быть ускорено или замедлено с увеличением их скорости. Модель DPM также использовалась для расчета траектории и скорости частиц в кожухотрубных теплообменниках. В уравнении движения частицы учитывалась только сила сопротивления, а силой термофореза пренебрегали. Термофорез представляет собой отталкивание частиц нагретыми телами, вызванное силами, действующими со стороны газообразной фазы на находящиеся в ней неравномерно нагретые частицы аэрозоля.

Для аналогичного теплообменника для дымовых газов авторы применили алгебраическую модель удара твердой частицы о стенку для исследования влияния параметров потока и геометрических параметров на эффективность

осаждения. Авторы выявили, что, когда образуется слой загрязнения, падающие частицы будут сталкиваться со слоем загрязнения, а не с поверхностью стенки. Была также разработана численная модель, включающая осаждение частиц на сформированном слое загрязнения. В их модели критериями осаждения частиц были критический угол удара, критическая скорость прилипания и критическая скорость удаления. Распределение осаждения частиц монодисперсной системы диаметром 50 мкм сравнивались между экспериментами по визуализации и численным моделированием, и была получена хорошая сопоставимость данных исследований. Вышеупомянутые исследования были применены при сухом осаждении, которое происходило без конденсации дымовых газов.

Предложенная численная модель была реализована в ANSYS Fluent с помощью пользовательских функций. Результаты моделирования вычислительной гидродинамики (CFD) и лабораторных экспериментов были сопоставлены для проверки модели. С помощью моделирования CFD было проанализировано влияние размера и смачиваемости частиц на их удаление для использования в инженерных приложениях. Теплообменник имеет очень сложную конструкцию, так как в нем существует множество механизмов удаления, включая термофорез, инерционное воздействие, перехват, рост частиц и т.д.

Экспериментальная установка, представленная на рисунке 1.18, включала в себя воздуходувку, которая направляла окружающий воздух в электрический нагреватель для повышения температуры. Объемный расход входящего воздуха регулировался преобразователем частоты, а температура нагрева регулировалась контроллером температуры с цифровым дисплеем. Чтобы реализовать осаждение частиц, летучая зола от сжигания угля, собранная на электростанции, была введена генератором аэрозоля. В буфере горячий запыленный воздух смешивался с водяным паром, производимым парогенератором. Этот запыленный паровоздушный поток использовался для моделирования дымовых газов. Буфер был полностью предварительно нагрет, чтобы предотвратить конденсацию водяного пара. Впоследствии дымовой газ поступал в конденсационную

установку, которая содержала четыре теплообменника с шахматным пучком труб общей длиной 2 м. Четыре теплообменника с шахматным расположением пучка труб были подключены последовательно. Между дымовым газом и охлаждающей водой взаимодействие было при противотоке.

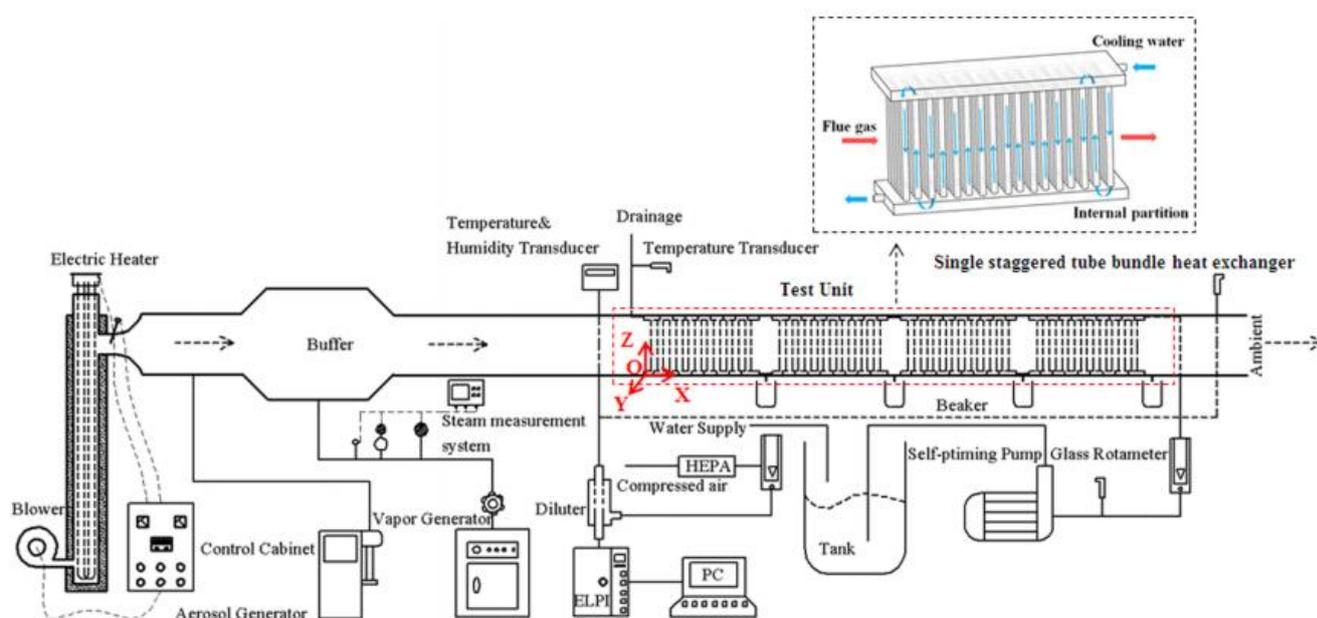


Рисунок 1.18 – Схема экспериментальной установки

В ходе работы было выяснено, что частицы меньше аэродинамического диаметра 0,03 мкм не были уловлены и обнаружены устройством ELPI. В результате зона конденсации этих мелкодисперсных частиц была дополнительно уменьшена до непосредственной близости от стенки трубы. Для численного исследования были выбраны краевые углы смачивания частиц при 26°, 37°, 46° и 53°.

Таким образом, общая эффективность удаления увеличивается с уменьшением угла смачивания частиц. Общая эффективность удаления тестового образца может достигать 76,7% при угле контакта 26°, а при краевом угле 53° он составлял всего 41,2%, эффективность была практически одинаковой для углов смачивания 37° и 26° (рис. 1.19).

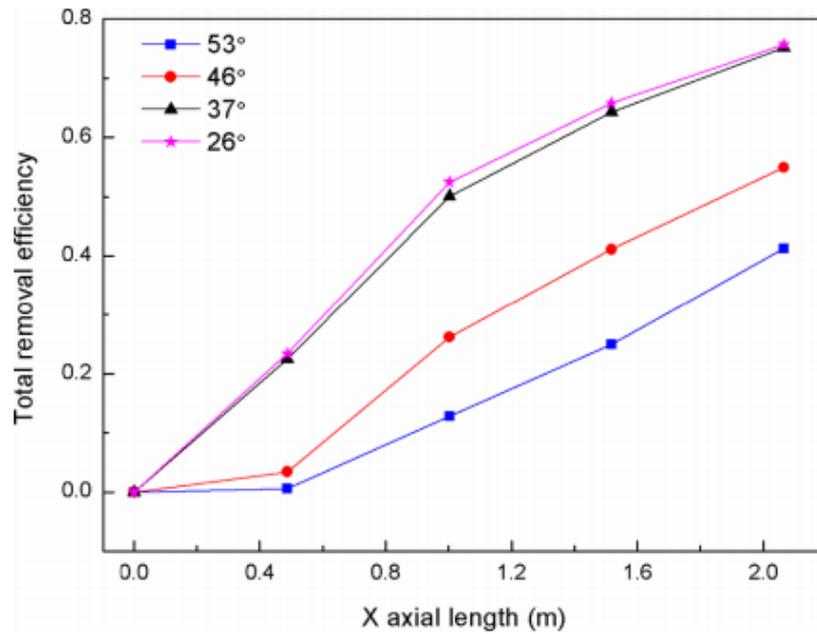


Рисунок 1.19 – Изменение общей эффективности удаления частиц в направлении потока при различных углах смачивания

Согласно результатам моделирования CFD, эффективность удаления частиц всегда увеличивалась вдоль направления потока. С уменьшением краевого угла эффективность удаления увеличивалась. Но рост эффективности удаления был ограничен минимальным значением угла контакта. С увеличением размера частиц эффективность удаления сначала снижалась, а затем повышалась. Подобно изменяющемуся закону эффективности удаления, скорость роста среднего диаметра увеличивалась с уменьшением краевого угла частиц.

Глава 2 Очистка дымовых газов ТЭС от мелкодисперсных частиц

2.1 Разработка сепаратора для улавливания мелкодисперсных частиц

Для очистки дымовых газов ТЭС, работающих на твердых видах топлива, от мелкодисперсных частиц размерами менее 10 мкм был разработан сепаратора (рис. 2.1). Устройство представляет собой несколько рядов элементов (двутавровых или дугообразных), которые заключены в корпус (рис. 2.2). Вид элементов определяется технологическими параметрами предприятия, на котором планируется установка сепаратора. При необходимости минимизации потери давления при очистке газовых выбросов в сепараторе выбираются дугообразные элементы, если данный параметр существенно не критичен, то устанавливаются двутавровые элементы, так как их эффективность при очистке газа выше, но из-за более сложной формы двутавровых элементов гидравлическое сопротивление аппарата увеличивается.



Рисунок 2.1 – Трехмерная модель сепаратора с двутавровыми элементами
(вид с разрезом)

С целью обеспечения минимального прогиба балки удерживаются между собой двумя поперечными пластинами, которые фиксируются по высоте и

крепятся к корпусу аппарата. Отличительной особенностью аппарата является то, что элементы могут быть заключены в корпус любой формы, что позволяет интегрировать сепаратор практически в любую схему очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц [111-117].



Рисунок 2.2 – Трехмерная модель сепаратора с дугообразными элементами
(вид с разрезом)

Очистка дымовых газов ТЭС от мелкодисперсных частиц происходит следующим образом: дымовые газы поступают в сепаратор через входной патрубок из специально подведенного газохода, далее при обтекании газом дугообразные элементы внутри аппарата возникают центробежные силы, которые существенно влияют на структуру движения потока, в результате частицы выбиваются из структурированного потока и прилипают к стенкам дугообразных элементов или падают на дно аппарата, после чего очищенный газ выходит из сепаратора через выходной патрубок. В связи с тем, что очистка газа от мелкодисперсных частиц происходит преимущественно за счет центробежных сил, то для достижения их максимального значения элементы относительно друг друга располагались по следующему принципу: окружность, проведенная из центра любого элемента должна проходить через крайние точки элементов соседних рядов. Упрощенная схема устройства представлена на рисунке 2.3.

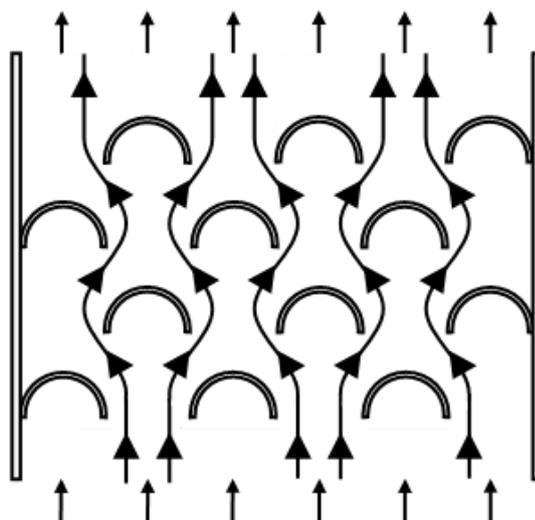


Рисунок 2.3 – Упрощенная схема движения газового потока в сепараторе

Следует отметить, что осаждение мелких частиц на поверхностях элементов может происходить также за счет электростатических сил, броуновского движения, инерционных сил и совокупности всех этих факторов. Мелкодисперсные частицы оседают на поверхностях элементов, которые периодически очищаются с помощью специального оборудования [118-123].

2.2 Установка сепаратора в технологическую схему очистки газовых выбросов от твердых частиц

Как правило, технологическая схема очистки газовых выбросов от твердых частиц состоит из ряда аппаратов грубой очистки: пылеосадительные камеры или циклоны, которые позволяют эффективно очищать газовые выбросы от частиц размером более 10 мкм и после них устанавливается один экземпляр более дорогого и сложного аппарата: рукавный или электростатический фильтр, позволяющие уловить оставшиеся частицы до требуемого значения концентрации. Данная схема достаточно хорошо реализуется на предприятиях (рис. 2.4). Однако быстрое загрязнение рукавных приводит к существенному снижению степени очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц размером до 10 мкм. В результате большая часть частиц попадает в атмосферу, что влечет экологически штрафы на предприятии.

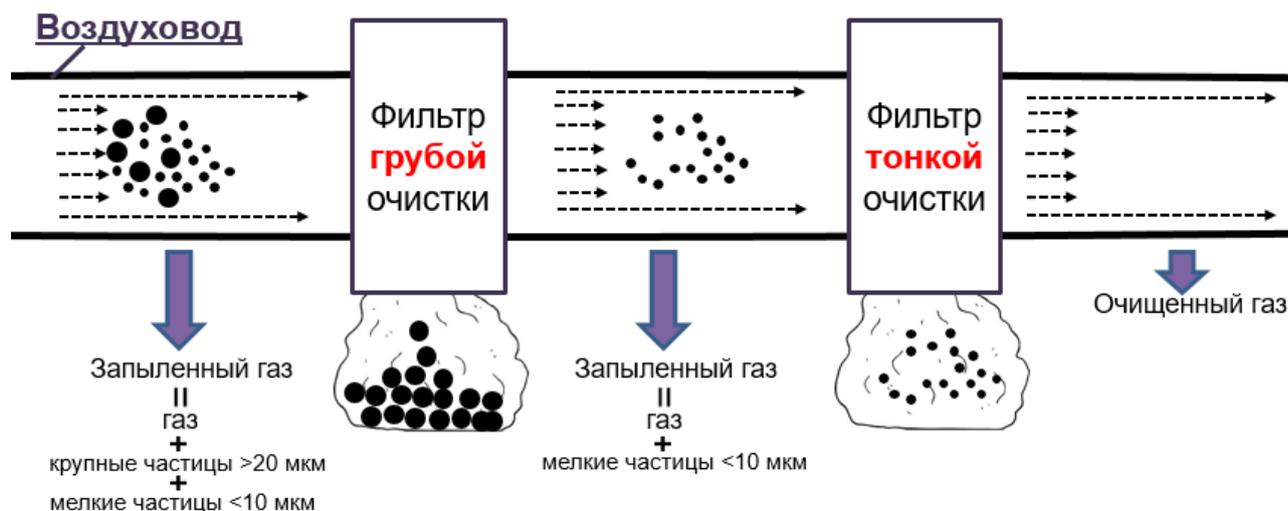


Рисунок 2.4 – Классическая схема очистки газовых выбросов от твердых частиц в первый период

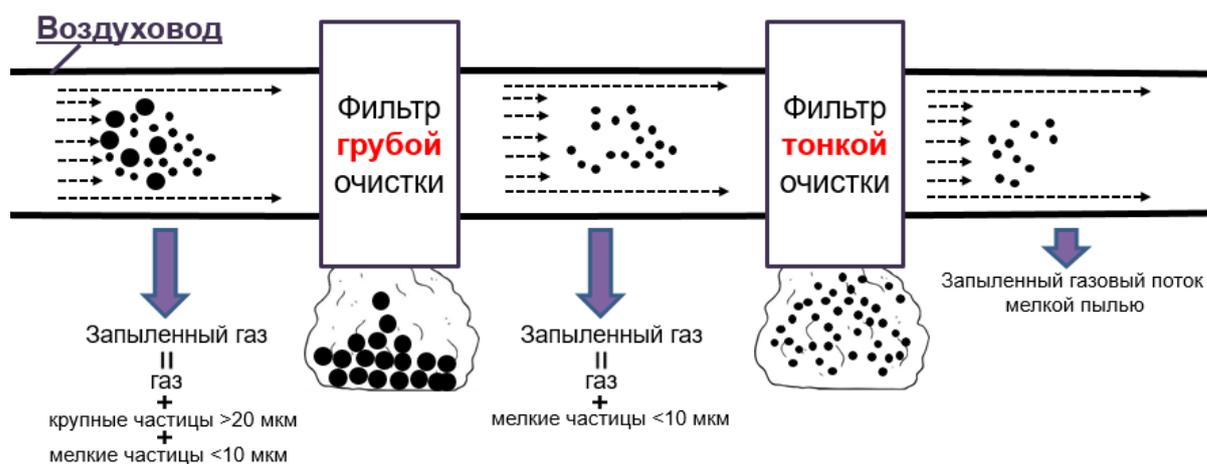


Рисунок 2.5 – Классическая схема очистки газовых выбросов от твердых частиц через достаточно продолжительное время работы

Для решения данной проблемы необходима более частая замена дорогостоящих фильтрующих элементов рукавных фильтров или очистка электростатических фильтров, что является неблагоприятным фактором для предприятий, так как происходит остановка технологического цикла, что влечет существенную потерю финансовых средств предприятий (рис. 2.5).

Сепаратор предлагается использовать в качестве промежуточной ступени очистки газа от мелкодисперсных частиц размером менее 10 мкм, которое будет

располагаться после аппаратов грубой очистки перед фильтром тонкой очистки. Таким образом, сепаратор позволит продлить срок службы дорогих фильтров в несколько раз (рис. 2.6).

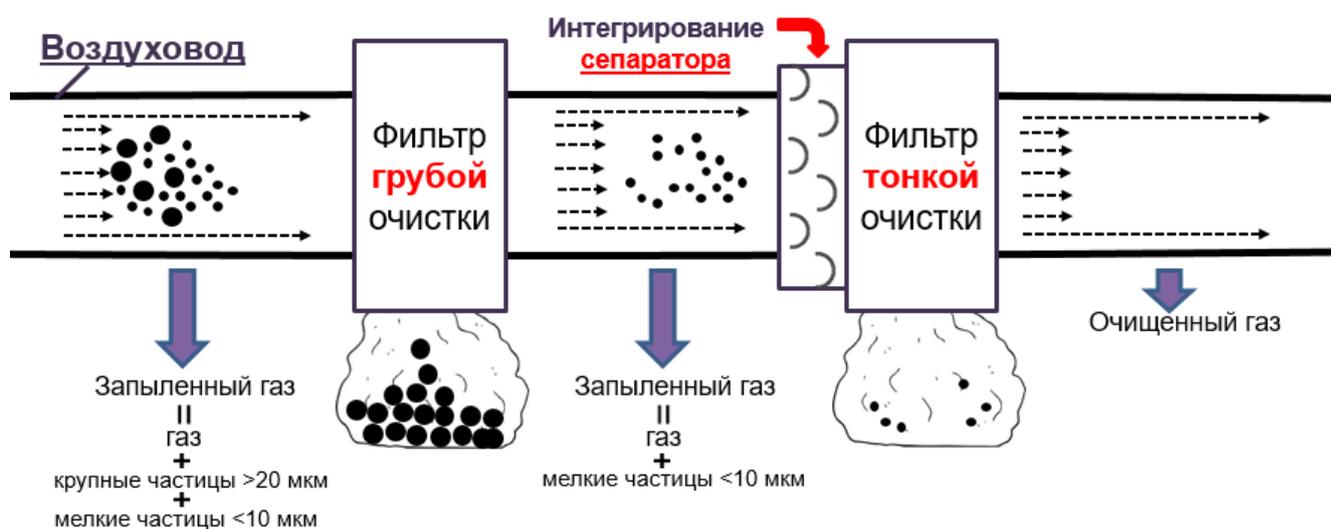


Рисунок 2.6 – Схема очистки газовых выбросов после интегрирования в нее сепаратора

Следует отметить, что очистка сепаратора будет производиться совместно с аппаратом тонкой очистки, что позволит оставить неизменным количество остановок работы предприятия для данных процессов.

2.3 Определение оптимальных соотношений между элементами сепаратора

На рисунке 2.7 представлен вид сверху на сепаратор с двутавровыми элементами. Как отмечалось выше, наибольшее влияние на эффективность очистки газовых выбросов оказывает центробежная сила, отбрасывающая частицы к перегородкам при обтекании газового потока двутавровых элементов. Поэтому для увеличения эффективности очистки газовых выбросов необходимо увеличивать центробежную силу. Для этого соседние ряды элементов должны располагаться так, чтобы выполнялось условие: окружность, проведенная из центра элемента должна проходить через крайние точки выступов двутавровых элементов соседних рядов (рис. 2.8).

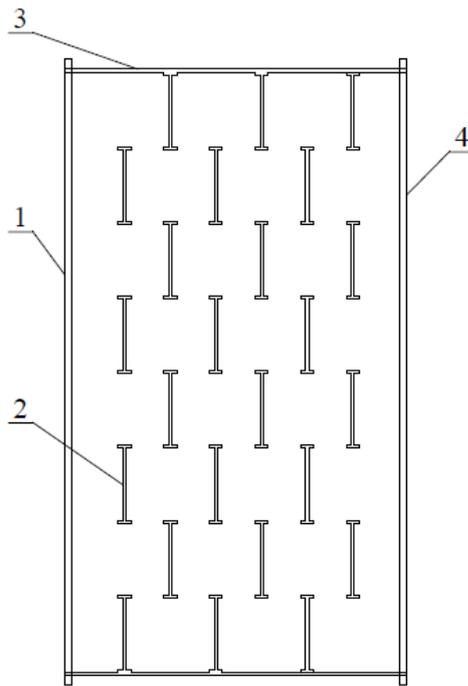


Рисунок 2.7 – Двухмерная модель прямоугольного сепаратора (вид сверху):
 1 – входной патрубок, соединяющий линию подачу воздуха с прямоугольным сепаратором; 2 – двутавровый элемент внутри сепаратора; 3 – корпус устройства; 4 – выходной патрубок сепаратора

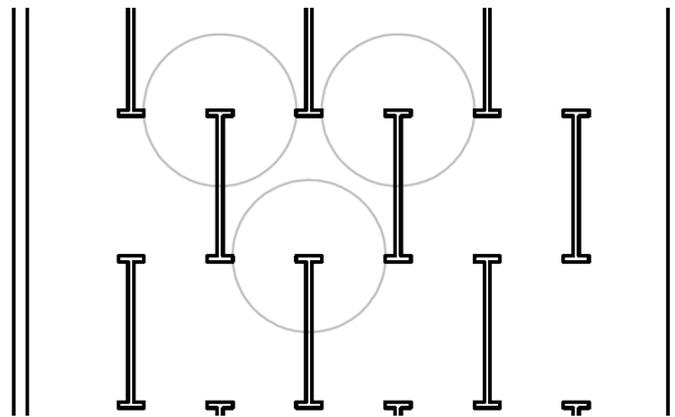


Рисунок 2.8 – Расположение элементов для достижения максимального значения центробежной силы (вид сверху)

Другими словами, расстояние между соседними рядами двутавровых элементов L можно определить по формуле 2.1.

$$L = \frac{1}{2}b(k+1), \quad (2.1)$$

где b – длина элемента, м (рис. 2.9); k – безразмерный коэффициент.

Стоит отметить, что достижение высоких значений центробежных сил при относительно небольших скоростях газового потока существенно повышают очистку газа от твердых частиц.

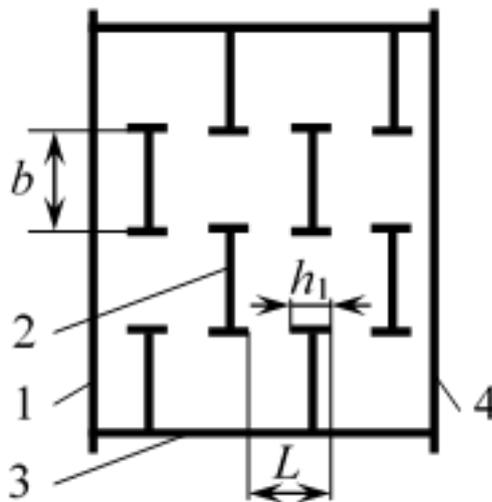


Рисунок 2.9 – Упрощенная двумерная модель сепаратора (вид сверху):

1 – входной патрубок, соединяющий линию подачу воздуха с прямоугольным сепаратором; 2 – двухтавровый элемент внутри сепаратора; 3 – корпус сепаратора; 4 – выходной патрубок сепаратора

Безразмерный коэффициент k был введен для удобства оценки влияния размеров двухтаврового элемента на потери давления в аппарате и на его эффективность, который вычисляется по формуле:

$$k = \frac{h_1}{b}, \quad (2.2)$$

где h_1 – длина выступа двухтаврового элемента, м (рис. 2.9).

Для определения оптимального значения безразмерного коэффициента k была проведена серия численных исследований, в ходе которых изменялись линейные длины двухтавровых элементов и длины их выступов.

Для численного исследования была построена модель прямоугольного сепаратора с высотой 192 мм, шириной 104 мм и длиной 90 мм. Внутри аппарата было расположено 5 рядов двутавровых балок, для просмотра линий тока газа с минимальным влиянием торцевого эффекта. Элементы имели длину $b = 14$ мм, так как ранее при этом значении наблюдалась наибольшая эффективности осаждения частиц, толщина двутавровых сепарационных элементов составляла $\delta = 0,5$ мм. На концах двутавровых балок имеются дополнительные выступы длиной h_1 , мм. Расстояние между рядами двутавровых балок принималось L , мм.

Начальная температура исследуемой среды принималась равной 20°C , давление окружающей среды 10^5 Па, объемный расход газового потока варьировался от 0,05 до 0,2 м³/с. Модель турбулентности SST (Shear Stress Transport).

В ходе исследований под рабочим телом принимался воздух, содержащий $n = 1000$ частиц плотностью $\rho = 1075$ кг/м³, диаметр частиц a варьировался от 1 до 10 мкм.

По проведенным численным исследованиям был получен набор данных, по которым для определения оптимального значения безразмерного параметра k был определен коэффициент гидравлического сопротивления ξ , который вычислялся по следующей формуле:

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{b}{H} \frac{\Delta p}{\rho w_h^2}, \quad (2.3)$$

где Δp – потери давления в сепараторе, Па; H – расстояние между первым и последним рядом двутавровых элементов, м; w_h – скорость в сужении прямоугольного сепаратора, м/с.

Скорость в сужении w_h для устройства с 8-ю элементами в каждом ряду определялась по формуле:

$$w_h = \frac{16n_i W}{2n_i - 1}, \quad (2.4)$$

где n_i – количество двутавровых элементов в каждом ряду прямоугольного сепаратора; W – входная скорость, м/с.

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ от безразмерного параметра k представлена на рисунке 2.10. Как видно по данному графику в пределах k от 0,2 до 0,3 достигается наименьший коэффициент гидравлического сопротивления.

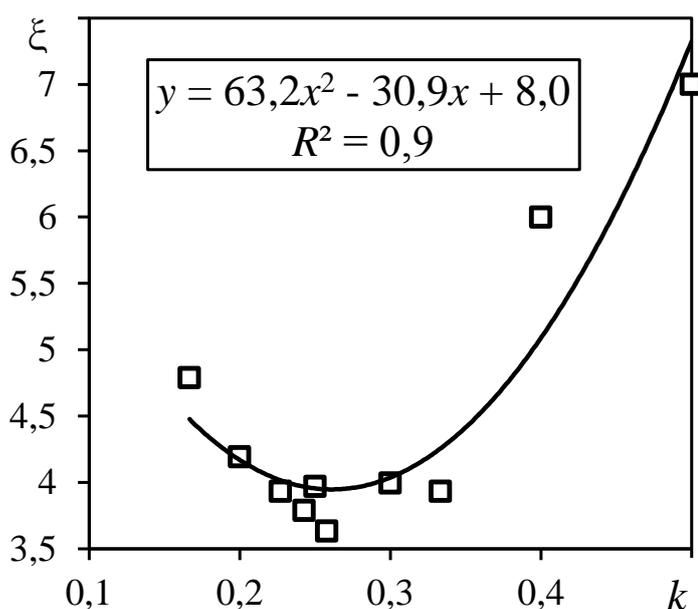


Рисунок 2.10 – Характер изменения коэффициента гидравлического сопротивления ξ от безразмерного параметра k

В ходе анализа статистических данных было получено уравнение, отображающее зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ от безразмерного параметра k :

$$\xi = 63,2k^2 - 30,9k + 8. \quad (2.5)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления имеет локальный минимум в диапазоне изменения значений k от 0,15 до 0,5. Проведя исследование полученной зависимости можно получить, что $k = 0,25$. Таким образом, при данном значении безразмерного параметра k достигается наименьшее значение коэффициента гидравлического сопротивления ξ (рис. 2.10).

Также численные исследования показали, что при значении $k = 0,25$ наблюдается максимальная эффективность улавливания мелкодисперсных частиц (рис 2.11).

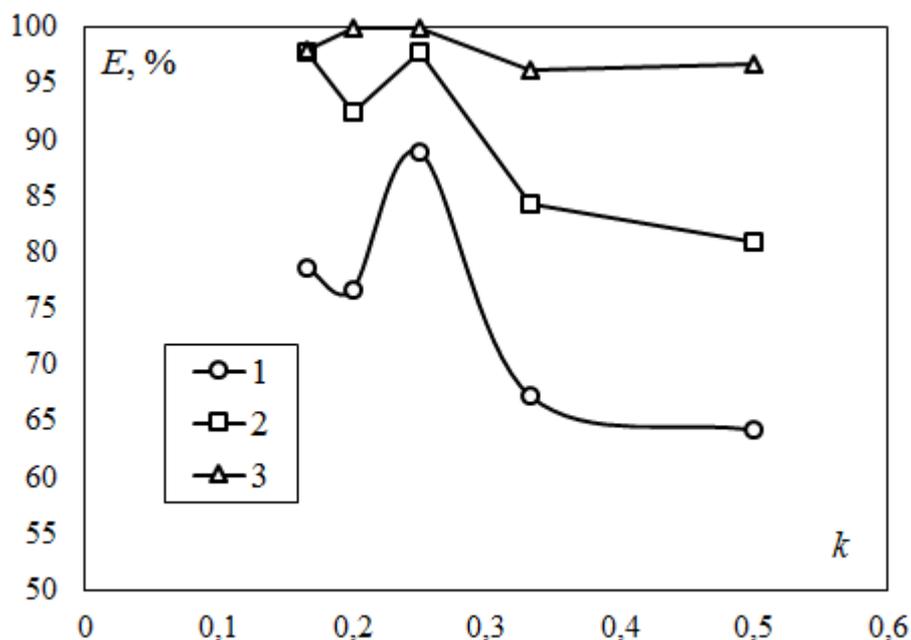


Рисунок 2.11 – Характер изменения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц от безразмерного параметра k при разных диаметрах частиц a , мкм: 1 – 3; 2 – 5; 3 – 7

Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц размером в диапазоне от 3 до 10 мкм прямоугольным сепаратором при $k = 0,25$ в среднем равна 93 % при входном объемном расходе $Q = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$.

В ходе данного исследования было установлено, что при значении безразмерного параметра $k = 0,25$ оптимальное значение длины двутаврового элемента $b = 14 \text{ мм}$ (рис. 2.12). Таким образом, при необходимости очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц любого диаметра максимальная эффективность прямоугольного сепаратора достигается при значении длины двутаврового элемента $b = 14 \text{ мм}$.

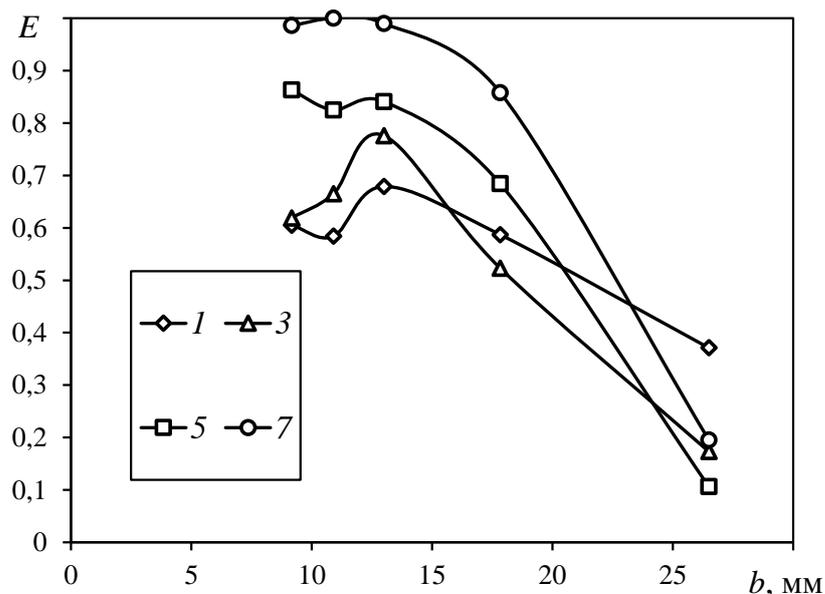


Рисунок 2.12 – Характер изменения эффективности прямоугольного сепаратора от длины балки двутаврового элемента при различных диаметрах частиц a , мкм: 1 – 1; 3 – 3; 5 – 5; 7 – 7

Стоит отметить, что в ходе данного исследования (рис. 2.12), для изменения длины двутаврового элемента b изменялось количество n_i двутавровых элементов в каждом ряду. Это производилось для того, чтобы сохранить неизменность геометрических размеров внешнего корпуса прямоугольного сепаратора.

В дальнейших исследованиях сепаратора с двутавровыми элементами значение безразмерного параметра k принималось равным 0,25.

2.4 Определение оптимального количества рядов внутри сепаратора

Исследования для определения оптимального количества рядов двутавровых элементов в сепараторе производились для упрощенной модели сепарационного аппарата (рис. 2.13). Сепаратор состоял из 8 рядов стальных сепарационных элементов, в каждом из которых находилось по 6 двутавровых элементов. Конструктивные размеры устройства варьировались в диапазоне: ширина от 120 до 600 мм, высота от 95 до 580 мм.

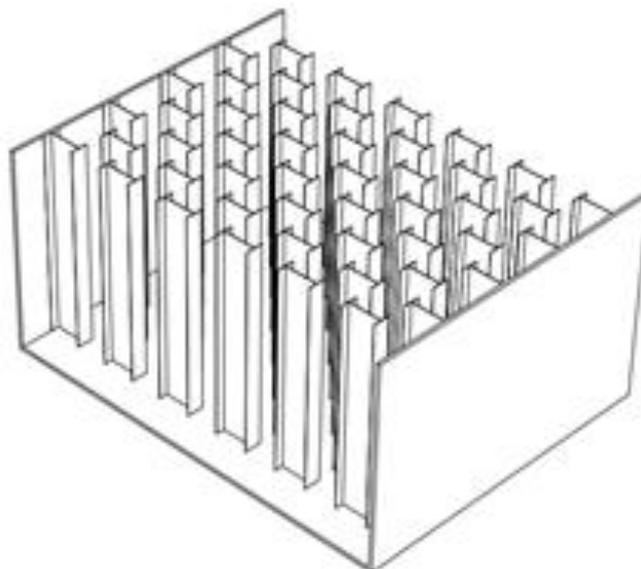


Рисунок 2.13 – 3D модель прямоугольного сепаратора

Газовая смесь, состоящая из воздуха и частиц продуктов сгорания, попадала на двутавровые балки по трубе, соединяющей камеру сгорания и окружающую среду. Диаметр частиц продуктов сгорания a изменялся от 10 до 100 мкм. В ходе исследований на каждой поверхности i -ого ряда балок был зафиксирован массовый расход частиц продуктов сгорания G_i . Понятно, что наиболее интенсивно частицы оседают на первых рядах двутавровых балок, расположенных по направлению движения смеси. Исследования производились в ПК Ansys. Для визуализации результатов исследования на графиках (рис. 2.14 и рис. 2.15) представлено изменение отношения массового расхода частиц продуктов сгорания на i -ом ряду балок к полному массовому расходу продуктов сгорания по всем рядам балок G_i/G . В ходе каждого исследования изменялся один из следующих параметров: диаметр частиц, шаг балок, начальная скорость смеси, а остальные приравнивались к базовым параметрам – диаметр частиц 30 мкм, начальная скорость смеси 15 м/с, шаг между балками 30 мм, ширина балки 15 мм. Также задавались некоторые постоянные параметры, а именно: на выходе из сепаратора: атмосферное давление 10^5 Па; массовый расход продуктов сгорания $G = 50$ г/с (0,05 кг/с); начальная скорость частиц 0 м/с; температура воздуха 273,15 К.

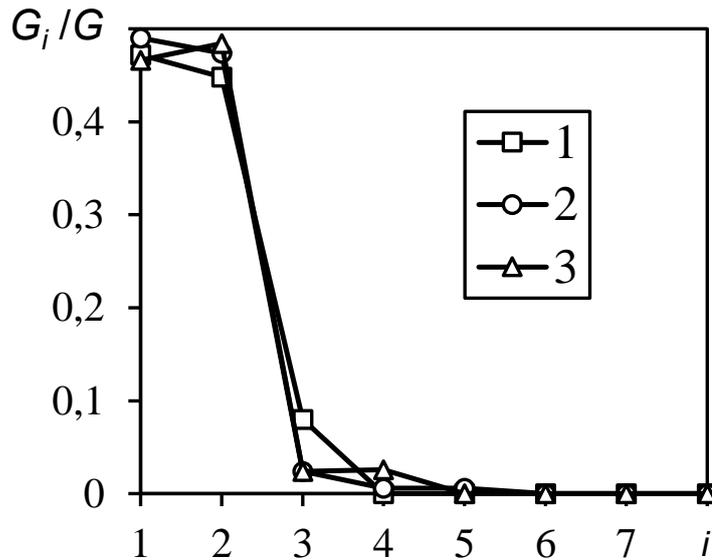


Рисунок 2.14 – Изменение отношения G_i/G по рядам двутавровых балок при начальной скорости смеси, м/с: 1 – 5, 2 – 15, 3 – 25

Результаты показали, что нагнетание вентилятором относительно больших скоростей не приводит к значительному увеличению числа уловленных твердых частиц из дымовых газов ТЭС (рис. 2.14). Линии, характеризующие различные скорости поступления смеси в аппарат, практически идентичны друг другу. На первых двух рядах балок оседает примерно 90% примесей, остальные частицы оседают на балках последующих рядов по направлению движения смеси.

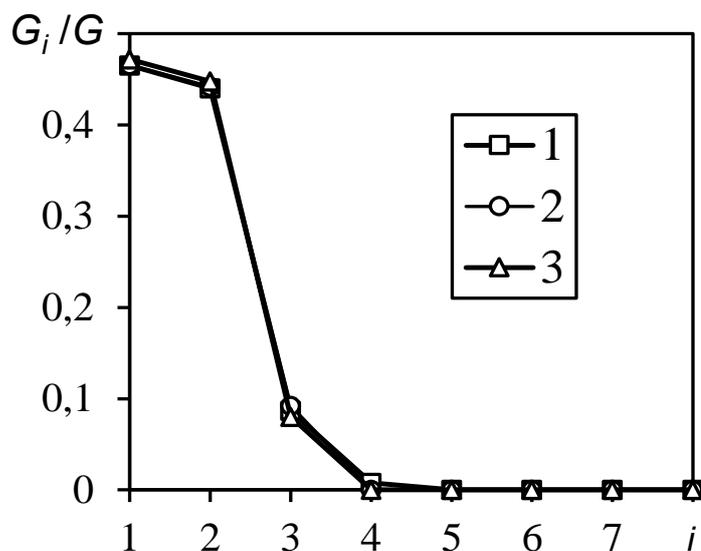


Рисунок 2.15 – Изменение отношения G_i/G по рядам двутавровых балок при диаметре частиц a , мкм: 1 – 10, 2 – 30, 3 – 100

С учетом полученных результатов на рисунке 2.15, было рассмотрено влияние диаметра частиц на процесс их осаждения на разных рядах балок сепарационного устройства при начальной скорости смеси 15 м/с (рис. 2.15). Траектории движения частиц диаметром 10–100 мкм существенно не отличаются друг от друга, следовательно, количество осажденных частиц на разных рядах балок будут примерно одинаковым. Поэтому нет необходимости в установке более мощных вентиляторов. Создание скорости газового потока 10-15 м/с будет являться достаточным условием для эффективной очистки от мелкодисперсных частиц.

Основная часть продуктов сгорания оседает на первых двух рядах колонн, вследствие чего было рассмотрено влияние шага между сепарационными колоннами на осаждение частиц на данные ряды колонн. Увеличение шага между колоннами уменьшает эффективность первых рядов колонн к улавливанию частиц продуктов сгорания при скорости воздуха 5 м/с.

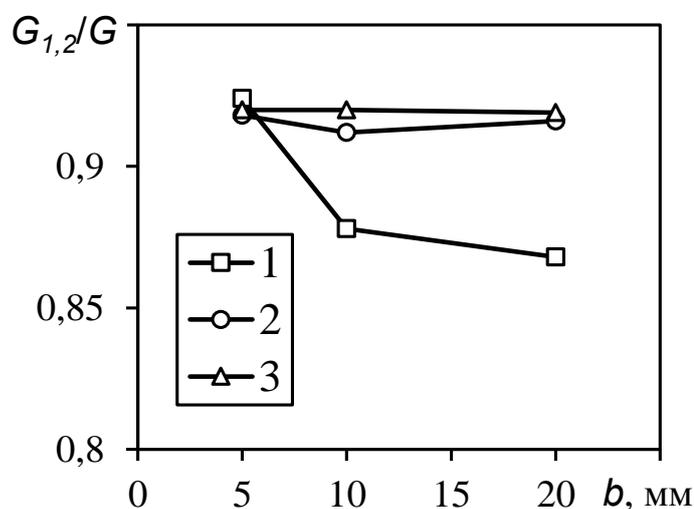


Рисунок 2.16 – Изменение отношения $G_{1,2}/G$ в зависимости от шага двутавровых балок b при начальной скорости смеси, м/с: 1 – 5, 2 – 15, 3 – 25

Однако при скоростях воздуха 10 и 15 м/с увеличение шага балок b с 5 до 20 мм практически не влияет на эффективность работы сепаратора (рис. 2.16), что позволяет производить размещение двутавровых элементов внутри корпуса

аппарата не столь плотно. Около 92% частиц оседает на первых двух рядах балок. Для обеспечения равнопроточности устройства, а значит и минимального гидравлического сопротивления, последующий ряд двутавровых балок должен быть расположен от предыдущего на расстоянии, равном 52–60% от длины двутавровой балки.

В ходе исследований установлено, что оптимальным количеством рядов двутавровых элементов в прямоугольном сепараторе является 4– 5. Основная часть частиц улавливается первыми двумя рядами элементов, если задать условие прилипания на поверхности.

2.5 Эффективность первого ряда прямоугольного сепаратора

Целью данной главы является исследование очистки газовых выбросов ТЭС от мелкодисперсной пыли первой ступенью прямоугольного сепаратора.

Исследования проводились для упрощенной модели прямоугольного очистительного сепаратора.

Для расчета процесса улавливания мелкодисперсных частиц до 10 мкм использовался метод конечных элементов в программном комплексе ANSYS Fluent. В ходе исследования использовалась модель турбулентности – SST.

В ходе исследований задавались следующие неизменные параметры: на выходе из устройства принималось атмосферное давление 10^5 Па, начальная скорость частиц в газовом потоке 0 м/с, число частиц, находящихся в газе n принималось равным 1000, массовый расход продуктов сгорания $G = 10$ г/с (0,01 кг/с). Для получения результатов изменялись следующие параметры: входная скорость W в диапазоне 5 – 15 м/с, диаметр частиц a в газе принимался в диапазоне 1 – 10 мкм, длина двутавровых элементов b принималась равной 10 и 14 мм. Число двутавровых элементов в ряду принималось равным 7.

Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц первым рядом прямоугольного очистительного сепаратора E определялась по формуле (2.6).

$$E = \frac{n - n_k}{n}, \quad (2.6)$$

где n_k – число, осевших частиц на всех рядах двутавровых элементов.

Коэффициент гидравлического сопротивления первой ступени очистительного прямоугольного сепаратора рассчитывалось по формуле (2.3). Скорость в сужении w_h можно определить по формуле (2.4).

Для определения соотношения между кинетической энергией взвешенных частиц и энергией их взаимодействия с элементами прямоугольного сепаратора рассчитывалось число Стокса Stk :

$$Stk = \frac{\rho_a a^2}{\mu b} \frac{14n_i W}{2n_i - 1}, \quad (2.7)$$

где μ - динамическая вязкость среды, Па·с.

Результаты исследований были представлены графически на рисунках 2.17 – 2.19. Проведенные численные исследования показали, что использование первой ступени прямоугольного сепаратора для улавливания мелкодисперсных частиц диаметром 1-10 мкм позволяет очищать газовые выбросы в среднем на 60,6 % при входной скорости газового потока 5-15 м/с.

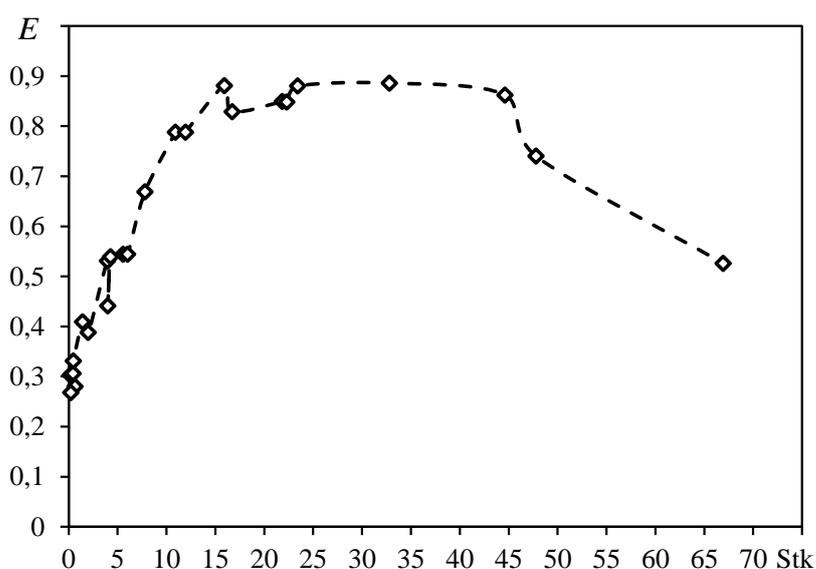


Рисунок 2.17 – Изменение эффективности улавливания мелкодисперсных частиц E от числа Стокса Stk

Максимальная эффективность очистки газовых выбросов ТЭС от пыли первой ступенью аппарата наблюдалась при числах Стокса в диапазоне 15 - 45 (рис. 2.17). В данном диапазоне средняя эффективность улавливания твердотельных частиц малого диаметра прямоугольным сепаратором составляет 84,2 %. Как видно по формуле (2.7) основными параметрами, влияющими на число Стокса в данном исследовании, являются входная скорость, длина двутаврового элемента и размер мелкодисперсных частиц. Это связано с тем, что остальные параметры оставались постоянными: динамическая вязкость среды $\mu = 18,1 \cdot 10^{-6}$, плотность частиц в запыленном потоке газа $\rho_a = 1075 \text{ кг/м}^3$.

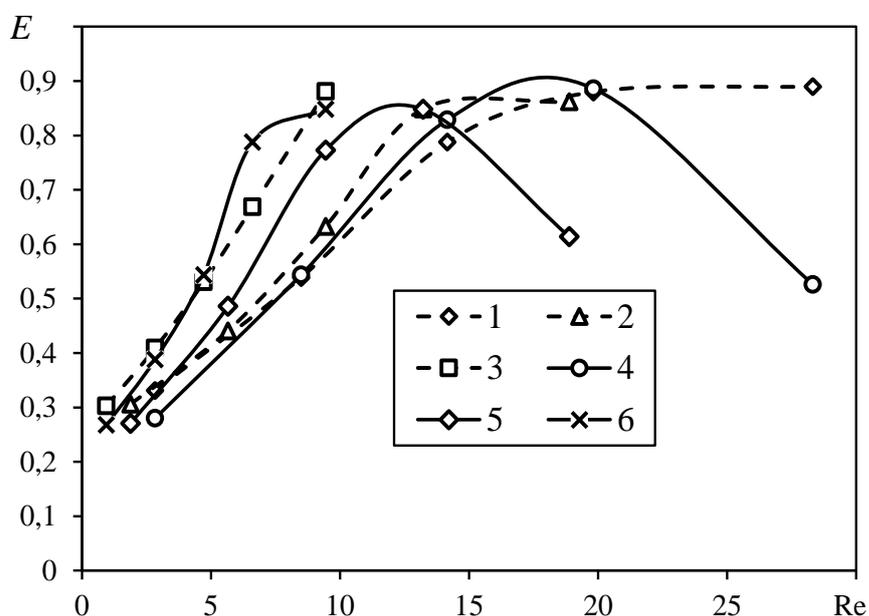


Рисунок 2.18 – Изменение эффективности улавливания мелкодисперсных частиц E от числа Рейнольдса Re при входной скорости газового потока W , м/с: 1,4 – 5; 2,5 – 10; 3,6 – 15. Линии отображают проведенные исследования для прямоугольного сепаратора с длиной двутавровых элементов $b = 10$ мм.

Пунктирные линии для длины двутавровых элементов $b = 14$ мм

Исследования показали, что эффективность прямоугольного сепаратора с двутавровыми элементами 10 и 14 мм при входной скорости газового потока 15 м/с отличается в среднем на 4 %, при входной скорости газового потока менее 15 м/с предпочтительнее использовать двутавровые элементы длиной 14 мм, так как

средняя эффективность улавливания мелкодисперсных частиц размерами в диапазоне 1 – 10 мкм прямоугольным сепаратором с данными двутавровыми на 5 % выше, чем при использовании сепаратора с двутавровыми элементами длиной 10 мм (рис. 2.18).

При необходимости улавливания из дымовых газов частиц преимущественно размером менее 7 мкм эффективнее нагнетать вентилятором относительно высокие входные скорости газа 10-15 м/с. При входной скорости газового потока менее 10 м/с наблюдалось повышение эффективности очистки газа от частиц пыли более 8 мкм. Данное влияние входной скорости газового потока на эффективность очистки газа от полидисперсных частиц в основном можно охарактеризовать вследствие отскока частиц пыли от двутавровых элементов обратно в газовый поток.

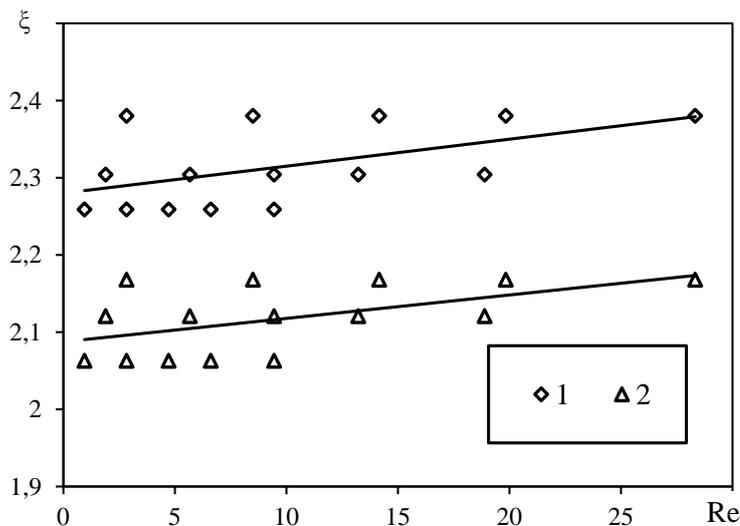


Рисунок 2.19 – Изменение коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса при различных значениях ширины двутавровых элементов

b , мм: 1 – 14; 2 – 10

При входной скорости газового потока 5 м/с потери давления в сепараторе составляют 411 и 450 Па для двутавровых элементов длиной 10 и 14 мм соответственно. При входной скорости 15 м/с потери давления составляют 3887 и 4268 Па для двутавров длиной 10 и 14 мм соответственно. Коэффициент гидравлического сопротивления сепаратора при скоростях газового потока в

диапазоне 5 – 15 м/с в среднем равен 2,28 и 2,08 для аппаратов с шириной двутавровых элементов 14 и 10 мм соответственно (рис. 2.19). Максимальная относительная погрешность для данного исследования составила 4,22 %.

Таким образом, данное исследование показало, что первая ступень сепаратора позволяет очищать газовые выбросы ТЭС от пыли в среднем на 60,6 %.

Следует отметить, что в ходе данного исследования задавалось условие прилипания, то есть при контакте частиц со стенками элементов, они на них оставались.

2.6 Влияние формы элементов сепаратора на эффективность очистки газовых выбросов ТЭС и гидравлического сопротивления аппарата

В проведенных исследованиях было рассмотрено различное конструктивное оформление элементов внутри прямоугольного очистительного сепаратора. Особый интерес представляет конструктивное оформление элементов внутри аппарата, которые должны способствовать обеспечению высокоэффективному улавливанию твердотельных частиц и не быть причиной высокого гидравлического сопротивления в аппарате.

В ходе исследований рассматривались двутавровые, *П* – образные, *V* – образные, дугообразные элементы. Численные расчеты показали, что наиболее эффективно, с меньшими энергозатратами использовать двутавровые, *П* – образные и дугообразные элементы.

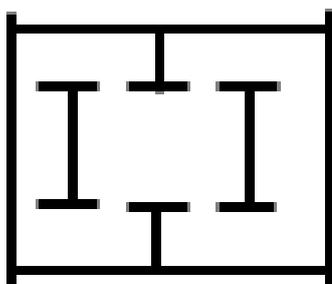


Рисунок 2.20 – Конструктивное оформление двутавровых элементов внутри сепаратора (вид сверху)

На рисунке 2.21 представлено конструктивное оформление Π – образных элементов.

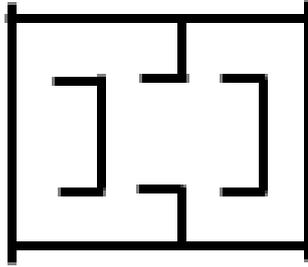


Рисунок 2.21 – Конструктивное оформление Π - образных элементов внутри сепаратора (вид сверху)

Π -образные элементы были образованы сдвижением прямолинейного участка элемента b в сторону выходного патрубка 4 до тех пор, пока длина прямолинейного участка элемента b и его выступы h_1 не смыкались, не оставляя зазоры со стороны выходного патрубка 4 (рис. 2.9). Предполагалось, что Π -образные элементы будут способствовать снижению гидравлического сопротивления в аппарате за счет более структурированного газового потока относительно двутавровых элементов, за которыми образовывались зоны завихрения, повышающие гидравлическое сопротивление сепаратора.

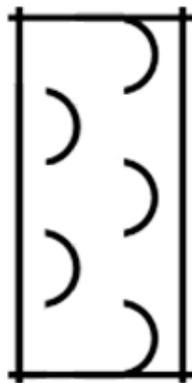


Рисунок 2.22 – Конструктивное оформление дугообразных элементов внутри сепаратора (вид сверху)

Численный расчет производился при следующих граничных условиях: на входе в сепараторы задавался объемный расход $Q = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$, на выходе

принималось атмосферное давление 101 325 Па. Для получения сравнительных данных между двумя сепараторами с различным конструктивным оформлением элементов внутри аппаратов (двухтавровые и Π – образные элементы) изменялись длина элемента b и его выступы h_1 , диаметр частиц a . Постоянными оставались следующие параметры: начальная скорость частиц 0 м/с, число частиц, находящихся в газе n принималось равным 1000, массовый расход продуктов сгорания $G = 10$ г/с (0,01 кг/с).

В ходе исследований размеры внешнего корпуса прямоугольного сепаратора оставались постоянными, вследствие этого для исследования влияния изменения длины элементов сепаратора на его эффективность изменялось количество элементов в каждом ряду: при увеличении длины элементов сепаратора их количество в каждом ряду уменьшалось, а при уменьшении длины элементов сепаратора их количество в каждом ряду увеличивалось.

В ходе расчетов были получены формулы, по которым можно определить геометрические размеры элементов внутри сепаратора.

Длина элементов b , м определялась по формуле:

$$b = \frac{c + n_b}{2n_b}, \quad (2.8)$$

где c – ширина прямоугольного сепаратора, м; n_b – количество элементов в прямоугольном сепараторе.

Проведенные численные исследования показали, что использование двухтавровых и Π -образных элементов в прямоугольном сепараторе целесообразно для разных конструкций. Наибольшая эффективность улавливания мелкодисперсных частиц достигается у Π -образных элементов при $b = 7$ мм в среднем равная 90 % (рис. 2.23), однако реализовать на практике такую длину элементов не всегда представляется возможным, поэтому наиболее оптимальным решением может стать использование двухтавровых элементов длиной $b = 14$ мм со средней эффективностью $E = 82$ % (рис. 2.24).

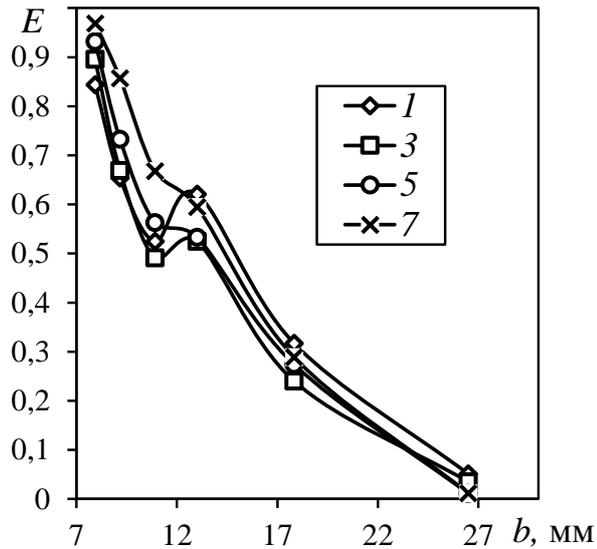


Рисунок 2.23 – Зависимость эффективности улавливания мелкодисперсных частиц от длины Π -образных элементов при различных диаметрах частиц a , мкм:

1 – 1, 3 – 3, 5 – 5, 7 – 7

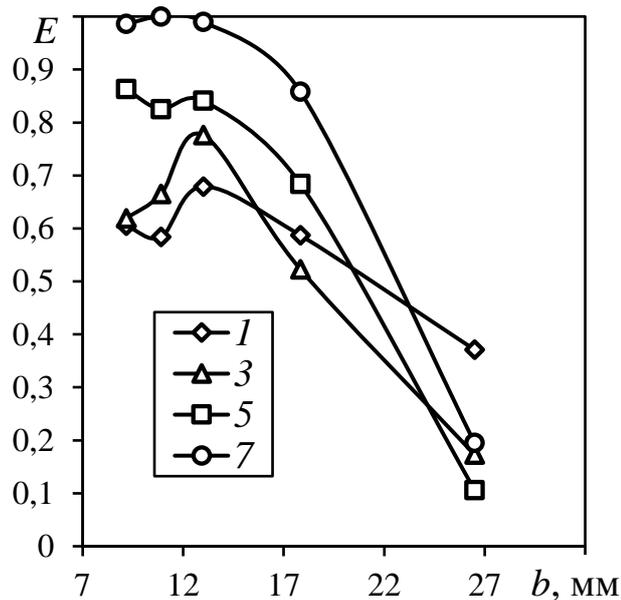


Рисунок 2.24 – Зависимость эффективности улавливания мелкодисперсных частиц от ширины двутавровых элементов при различных диаметрах частиц

a , мкм: 1 - 1, 3 - 3, 5 - 5, 7 - 7

Стоит отметить, что у Π -образных элементов эффективность улавливания частиц имеет тенденцию роста к 100% для любого диаметра частиц при

стремлении b к бесконечно малой величине (рисунок 2.23). Однако в данных исследованиях за наименьшую длину элемента b_{\min} принималось 7 мм, вследствие сложности изготовления малых элементов и их хрупкости, что влечет к частой поломке. На рисунке 2.24 представлена зависимость эффективности улавливания мелкодисперсных частиц от ширины двутавровых элементов.

Как указывалось, при данном исследовании одним из постоянных параметров являлась неизменная геометрия корпуса прямоугольного сепаратора, вследствие этого для изменения ширины элементов b производилось изменение их количества в каждом ряду, поэтому можно предположить, что из-за данного условия увеличение ширины двутавровых и Π -образных элементов в обоих случаях приводило к существенному снижению эффективности очистки газовых выбросов ТЭС (рис. 2.23 и рис. 2.24). При увеличении числа элементов в сепараторе происходило уменьшение числа сужающих проходов и, как следствие, центробежной силы, отбрасывающая частицы к стенкам элементов. Потери давления в аппаратах при использовании двутавровых и Π -образных элементов в ходе исследований были практически одинаковыми равными в среднем 409 и 387 Па соответственно.

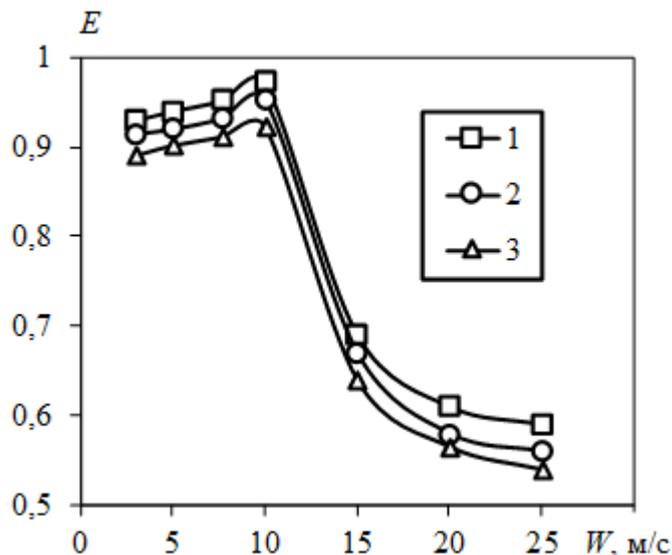


Рисунок 2.25 – Зависимость эффективности улавливания частиц диаметром 4 мкм из потока воздуха при различных формах элементов: 1 – двутавровые; 2 – П-образные; 3 – дугообразные.

В ходе расчета эффективности сепаратора с различными формами сепарационных элементов была определена эффективность улавливания мелкодисперсных частиц сепаратором при скорости газового потока до 10 м/с составляла 94,8, 92,9 и 90,7 % при использовании двутавровых, дугообразных и П-образных элементов соответственно. При скорости газового потока более 15 м/с эффективность устройства снижалась до 63,1, 60,3 и 58,1% при использовании двутавровых, дугообразных и П-образных элементов соответственно, вследствие перехода на другой режим работы (рис. 2.25)

Вследствие увеличения числа сужающих проходов, эффективность сепарации твердых частиц существенно возросла, относительно данных представленных на рисунках 2.23 и 2.24, при возрастании длины элементов b . Поэтому увеличение числа элементов в каждом ряду способствует увеличению эффективности улавливанию мелкодисперсных твердых частиц. Эффективность использования двутавровых элементов в среднем выше эффективности использования П-образных элементов на 32%.

При возможности изготовления элементов сепаратора, длина которых менее 7 мм эффективнее использовать прямоугольный сепаратор с П-образными элементами. В остальных случаях для достижения более высокой эффективности очистки газовых выбросов ТЭС от мелкодисперсных твердотельных частиц использование сепаратора с двутавровыми элементами является более предпочтительным.

В связи с высокой эффективностью очистки газовых выбросов в сепараторе и его низким гидравлическим сопротивлением при использовании двутавровых и П-образных элементов было рассмотрено новое конструктивное оформление элементов, основанных на совместном объединении двутавровых и П-образных элементов (рис. 2.26).

При данном оформлении элементов сепаратора каждая балка имеет 9 дополнительных выступов со стороны контакта с газом. Максимальную длину имеет центральный выступ, длина каждого последующего выступа по направлению к периферии балки уменьшается на 45 % от предыдущего. Данное

оформление двутавровой балки со стороны обтекания газом позволяет снизить гидравлическое сопротивление аппарата и повысить эффективность улавливания мелкодисперсной пыли по сравнению с аппаратом, не имеющих выступов на двутавровых балках. Принцип работы устройства заключается в том, что при движении многофазного потока между элементами устройства возникает центробежная сила, которая отбрасывает частицы пыли к балкам, и они извлекаются из газовых выбросов. Часть газового потока, которая движется перпендикулярно балкам, после контакта с ними, огибает их, теряя при этом часть энергии, но благодаря непосредственному контакту с балками, большая часть взвешенных частиц в газе выбивается из потока и под собственной силой тяжести оседает на нижней поверхности аппарата. Наличие нескольких рядов двутавровых балок повышает эффективность очищения газовых выбросов ТЭС от полидисперсных частиц за счет более структурированного газового потока.

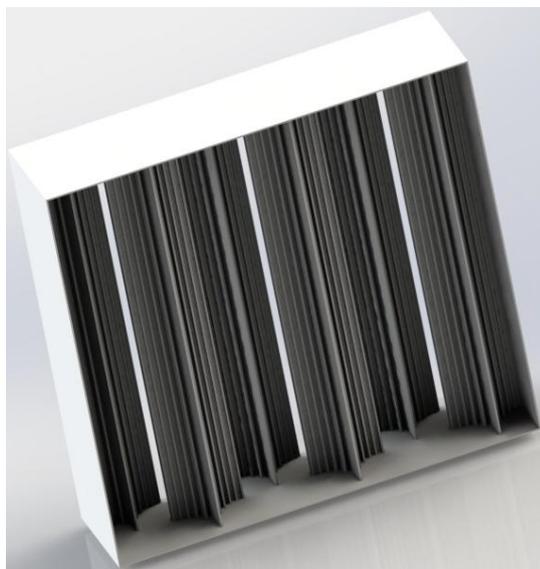


Рисунок 2.26 – 3D модель прямоугольного сепаратора с модифицированными элементами внутри сепаратора

Исследования проводились для упрощенной модели сепарационного аппарата. Основная часть мелкодисперсных частиц до 90 % оседает на первых двух рядах колонн, вследствие этого для упрощения расчета, исследования

проводились для сепаратора, состоящего из 2 рядов стальных балок длиной 120 мм, в каждом из которых находится по 3 элемента. Корпус аппарата имеет следующие геометрические размеры: $a = 120$ мм, $c = 30$ мм, $h = 120$ мм (рис. 2.26).

Газ, состоящий из газа и твердотельных частиц малого диаметра, поступаая в прямоугольный сепаратор, попадал на двутавровые балки, что приводило к выбиванию мелкодисперсных частиц из газовых выбросов за счет процессов, описанных выше. Диаметр частиц продуктов сгорания изменялся от 1 до 10 мкм, скорость газа W на входе в прямоугольный сепаратор варьировалась от 0,5 до 5 м/с. Параметры окружающей среды на выходе из прямоугольного сепаратора были заданы нормальными: атмосферное давление 101325 Па, температура воздуха 273 К. Также постоянными оставались следующие параметры: начальная скорость частиц 0 м/с, число твердотельных частиц n , находящихся в газе, принималось равным 1000 и массовый расход продуктов сгорания $G = 50$ г/с (0,05 кг/с). В ходе исследований на каждой поверхности 2-х рядов балок было определено количество, осевших из газовых выбросов частиц n .

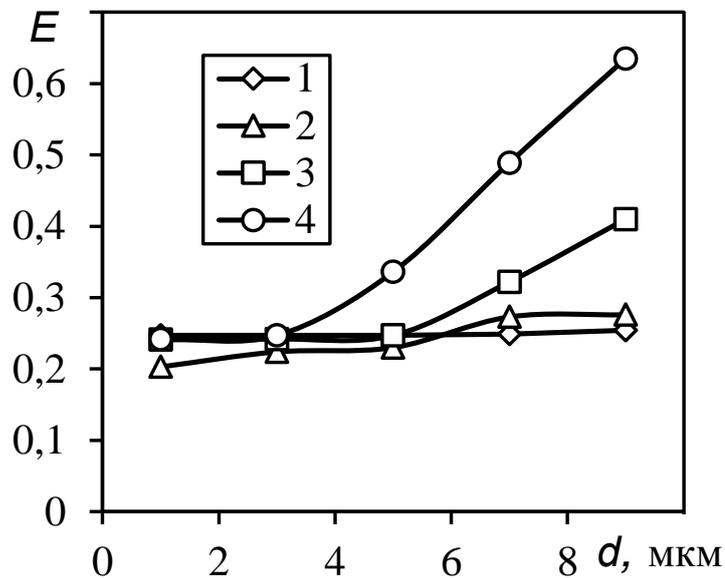


Рисунок 2.27 – Характер изменения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц E по росту их диаметра d при начальной скорости газа, м/с: 1 – 0,5, 2 – 1, 3 – 2, 4 – 5

Результаты исследования были представлены на рисунках 2.27 – 2.29. Проведенные численные исследования показали, что использование прямоугольного сепаратора для улавливания мелкодисперсных частиц в диапазоне 1 – 10 мкм позволяет очистить газовые выбросы ТЭС от данных частиц в среднем на 70,7 % при нагнетании вентилятором скоростей газа $W = 0,5 – 5$ м/с.

Наибольший эффект очистки газа от мелкодисперсной пыли сепарационными колоннами достигается при нагнетании скорости дымовых газов $W = 0,5-1$ м/с (рис. 2.28). В данном диапазоне скоростей улавливается около 75 % частиц диаметром 1-10 мкм. Как видно, на рисунке 2.27 линии 1 и 2, характеризующие скорости дымовых газов $W = 0,5$ и 1 м/с соответственно, практически идентичны друг другу, кроме первой точки, характеризующая диаметр частиц 1 мкм, которая указывает, что нагнетание вентилятором относительно низких скоростей газовых выбросов до скоростей менее 1 м/с снижает эффективность улавливания сепаратором мелкодисперсных частиц диаметром менее 3 мкм. Для частиц диаметром более 3 мкм различие эффективности улавливания частиц сепарационными колоннами составляет около 0,01 – 0,09 % при разных скоростях газового потока в диапазоне 0,5-1 м/с. Создание скоростей газового потока более 2 м/с заметно снижает эффективность улавливания твердых мелкодисперсных частиц малого диаметра 1-10 мкм, чем при скоростях газа в диапазоне 0,5-1 м/с. В справочной литературе рекомендуется создавать условия, при которых скорость газового потока не превышала 3 м/с, что отчетливо подтверждается на рисунке 2.28: при скорости газового потока 2 м/с улавливается около 70,7 % частиц, но при увеличении скорости газа до 5 м/с происходит снижение очистки газа в среднем на 10 %.

За двутавровыми балками по мере движения газового потока в сепараторе, образовывались застойные области, в которых наблюдалось завихрение потока, что в целом повышало гидравлическое сопротивление аппарата, но в тоже время в данных завихрениях происходило очищение газа от мелкодисперсных частиц (рис. 2.28). Скорость газового потока увеличивалась до 2,5 м/с при начальной скорости 0,5 м/с. Увеличение скорости газа вызвано поворотами при обтекании

газом сепарационных колонн и застойными зонами. Исследования показали, что в среднем скорость газового потока увеличивается в 5 раз по отношению к начальной скорости, что снижает эффективность улавливания частиц.

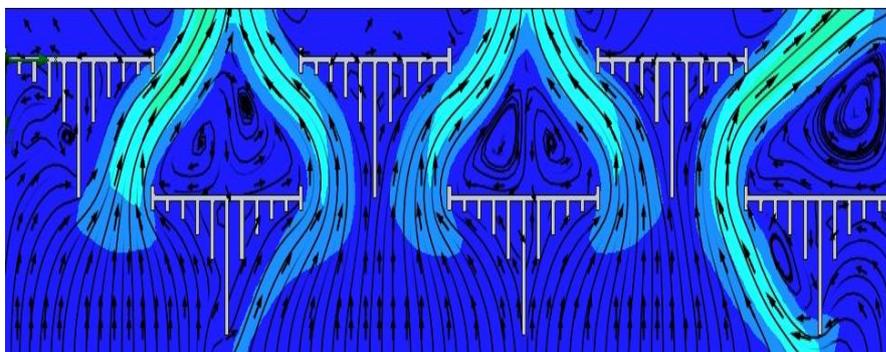


Рисунок 2.28 – Вектора скорости движения газового потока в прямоугольном сепараторе при начальной скорости газа 0,5 м/с (вид сверху)

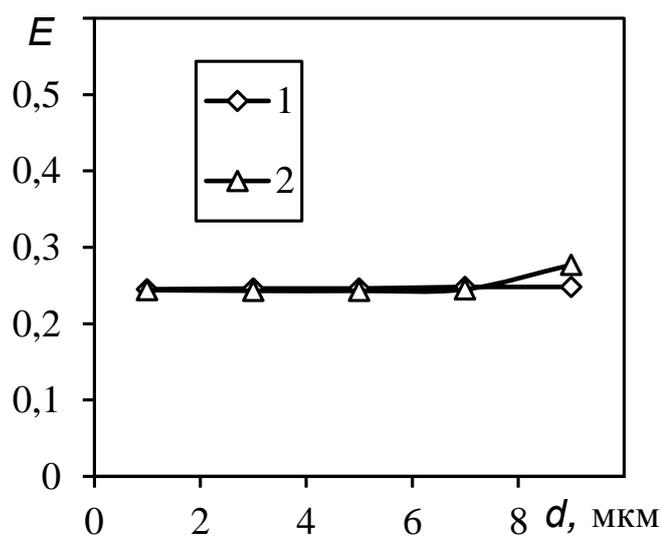


Рисунок 2.29 – Характер изменения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц E по росту их диаметра при начальной скорости газа, м/с: 1 – 0,5, 2 – 2

Увеличение всех геометрических элементов прямоугольного сепаратора в 2 раза при прочих равных условиях позволяет повысить эффективность улавливания мелкодисперсных частиц до 75,2 % (рис. 2.29). Очистка газовых выбросов от частиц при различных начальных скоростях газа проходит

практически идентично по эффективности: при начальных скоростях газа 0,5 и 2 м/с эффективность улавливания мелкодисперсных частиц равна 75,3 % и 75,0 % соответственно.

Учитывая, что мере движения газа через сепаратор происходит увеличение его скорости, влекущее снижение эффективности улавливания частиц сепаратором, то решением может стать масштабирование всех элементов сепаратора, позволяющее выравнивать эффективность улавливания частиц в зависимости от скорости газа.

В ходе исследований установлено, что использование прямоугольного сепаратора позволяет улавливать до 75% твердых частиц малого диаметра в диапазоне 1-10 мкм. Однако в связи со сложностью формы элементов существенно повышается гидравлическое сопротивление.

Особый интерес представляло сравнительное исследование двутавровых и дугообразных элементов. В ходе данного исследования рассчитывались потери давления внутри сепаратора по следующей формуле:

$$\Delta p = p_1 - p_4, \quad (2.9)$$

где p_1 – давление на входном патрубке сепаратора, Па; p_4 – атмосферное давление на выходном патрубке, Па.

Результаты исследований по сравнению двутавровых и дугообразных элементов были представлены графически на рисунках 2.30 и 2.31. Показано, что использование прямоугольного сепаратора с двутавровыми элементами внутри устройства эффективнее, чем с дугообразными элементами. Однако потери давления при использовании двутавровых элементов выше, что повышает энергозатраты на перемещение газовых выбросов.

Средние эффективности улавливания мелкодисперсных частиц, размер которых находится в диапазоне 1-10 мкм при использовании двутавровых и дугообразных элементов равны 44,7 % и 61,7 % соответственно. Следует отметить, что дугообразные элементы позволяют улавливать мелкодисперсные частицы размером до 3 мкм в среднем с эффективностью 14,5 %, что на 6,5 %

выше, чем при использовании двутавровых элементах. Однако при размере частиц в диапазоне 4 – 10 мкм эффективность двутавровых элементов в среднем выше на 32,5 %, чем у дугообразных элементов. Можно отметить, что при диаметре частиц более 10 мкм эффективность двутавровых и дугообразных элементов близка к 100 % (рис. 2.30).

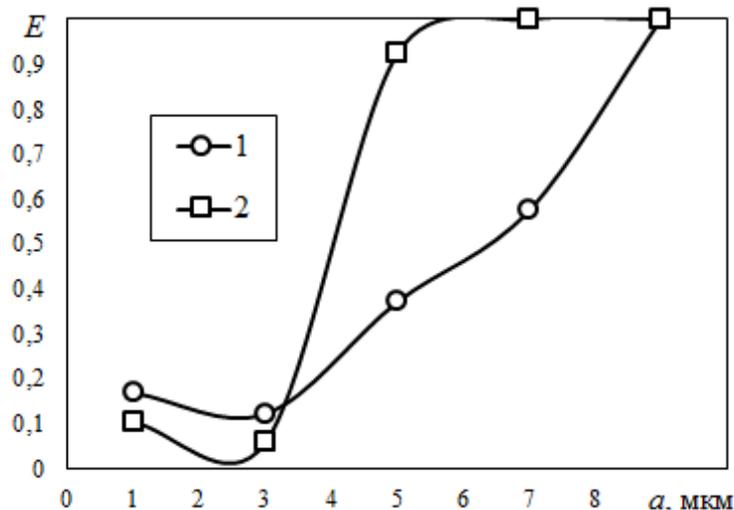


Рисунок 2.30 – Изменение эффективности улавливания мелкодисперсных частиц от их диаметра при различном конструктивном оформлении элементов:

1 – дугообразные элементы; 2 – двутавровые элементы

Более высокая эффективность улавливания мелкодисперсных частиц при использовании двутавровых элементов объясняется наличием выступов у элементов, которые образуют непроходимые перегородки и не позволяют твердым частицам проскальзывать по поверхности и возвращаться в газовый поток, как в случае с дугообразными элементами. Стоит отметить, что при контакте мелкодисперсных частиц с поверхностями элементов, как указывалось ранее, они прилипают к стенкам, однако по истечению времени, вследствие вибраций элементов, вызванных взаимодействием газового потока с ними, наблюдается проскальзывание частиц по поверхностям элементов.

Исследование показало, что потери давления при использовании дугообразных элементов меньше, чем при двутавровых элементах на 58,29 Па.

Более скругленные поверхности элементов позволяют существенно сократить количество местных сопротивлений в сепараторе (рис. 2.31).

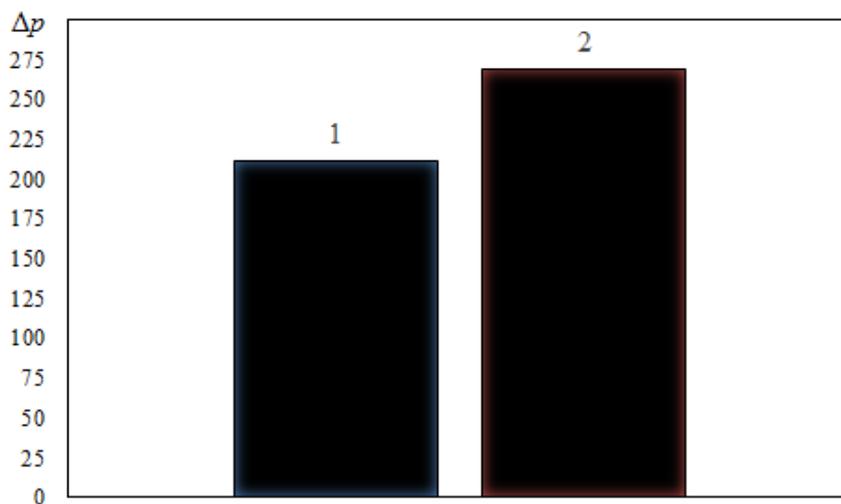


Рисунок 2.31 – Потери давления в прямоугольном сепараторе при различном оформлении элементов внутри устройства:

1 – дугообразные элементы; 2 – двутавровые элементы

Произведенное исследование показало, что при использовании двутавровых элементов эффективность прямоугольного сепаратора на 17 % выше, чем при использовании дугообразных элементов, однако возникает необходимость в более мощном компрессе в связи с наибольшими потерями давления.

Таким образом, было установлено, что наиболее оптимальными формами элементов сепаратора являются двутавровые и дугообразные. Двутавровые позволяют достичь более высокой эффективности очистки газовых выбросов ТЭС. При использовании дугообразных элементов, эффективность снижается, однако и уменьшаются потери давления.

2.7 Исследование структуры газового потока внутри сепаратора

Как отмечалось ранее, особая роль в процессе пылеочистки в сепараторе отводится центробежной силе. Поэтому элементы в сепараторе расположены относительно друг друга таким образом, чтобы достигалось ее максимальное

значение. При этом структура движения газового потока не должна нарушаться (рис. 2.32). На рисунке 2.32 представлена структура движения газового потока, где зеленый цвет отчетливо иллюстрирует возникновение центробежной силы между элементами сепаратора. Скорость газа в сужениях возрастает, что иллюстрируют желтый и красный цвета. Однако в некоторых случаях структура потока в сепараторе нарушается, что существенно влияет на снижение эффективности пылеочистки.

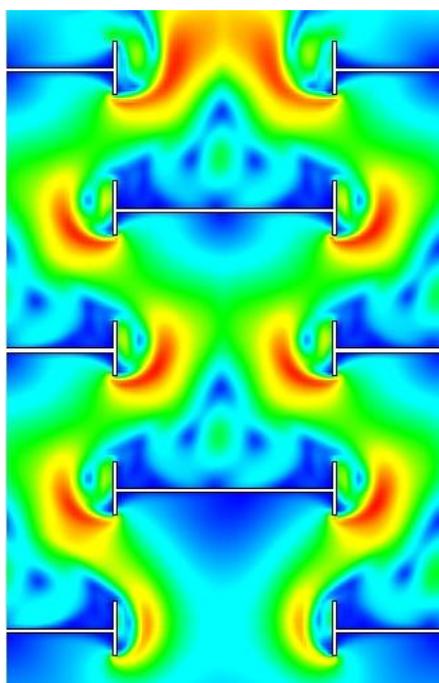


Рисунок 2.32 – Структура движения газового потока в прямоугольном сепараторе.

Для расчета процессов очистки загрязненных газовых потоков в прямоугольных сепараторах при различных длинах двутавровых элементов и входных скоростей газовых потоков использовался метод конечных элементов в программном комплексе ANSYS Fluent. В ходе исследования использовалась модель турбулентности – SST. Для упрощения численного расчета принимались следующие допущения: толщины двутавровых элементов и стенок корпуса не учитывались, на стенках двутавровых элементов задавалось условие прилипания для исключения отверстий на дне аппарата и возможности использования двумерной модели, так как по высоте устройства никаких изменений нет. В ходе

расчета изменялись следующие параметры: длина двутавровых элементов b , мм в диапазоне 10 – 50; число рядов m принималось равным 3, 5 и 7; входная скорость газового потока W , м/с варьировалась в диапазоне 1 – 10; диаметр частиц пыли a , мкм принимался равным из диапазона 1 – 10. Постоянными параметрами являлись: атмосферное давление на выходе из аппарата 10^5 Па; начальная скорость частиц в газовом потоке 0 м/с; число частиц, находящихся в газе n принималось равным 1000.

Особый интерес представляет эффективность каждой ступени прямоугольного сепаратора. Стоит отметить, что количество ступеней и количество рядов в сепараторе не равны. Вследствие того, что процесс осаждения частиц на двутавровые элементы первого и последнего рядов сепаратора отличаются от других рядов. Поэтому для нахождения количества ступеней прямоугольного сепаратора необходимо вычесть 2 из количества рядов двутавровых элементов. Эффективность каждой ступени прямоугольного сепаратора E_1 определялась по формуле:

$$E_1 = 1 - (1 - E)^{\frac{1}{m-2}}. \quad (2.10)$$

Для связи между конструктивными и физическими параметрами использовалось число Стокса Stk .

Результаты исследований были представлены графически на рисунках 2.33 – 2.35. Показано, что существует критическая скорость, до которой наблюдаются скачки коэффициента гидравлического сопротивления, что свидетельствует о нарушении структуры движения газового потока, и после которой возможно наблюдать изменение коэффициента гидравлического сопротивления в рамках нормы погрешности, что свидетельствует о структуре потока, представленной на рисунке 2.33. Обнаружены значения числа Стокса при которых достигается наибольшая эффективность каждой ступени прямоугольного сепаратора.

Критическая скорость для длины двутавровых элементов 10; 25 и 50 мм

равна 4,9 м/с; 2,9 м/с и 2 м/с соответственно. Скачки изменения погрешности коэффициента гидравлического сопротивления до критической скорости составляет до 70%, а после составляет не более 8% (рис. 2.33).

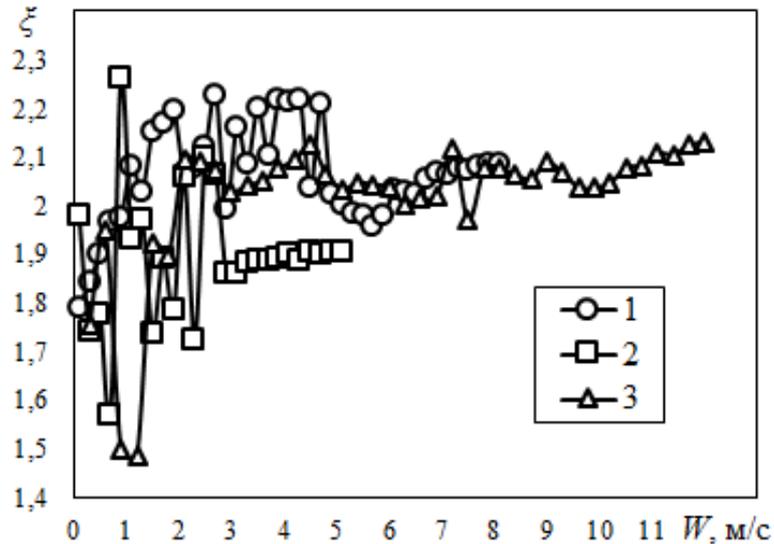


Рисунок 2.33 – Изменение коэффициента гидравлического сопротивления сепаратора от входной скорости газового потока при различных длинах двутавровых элементов, мм: 1 – 10; 2 – 25; 3 – 50

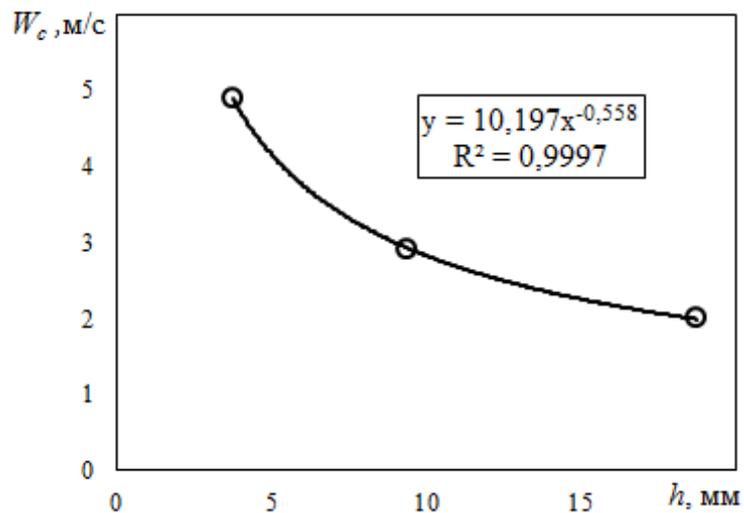


Рисунок 2.34 – Зависимость изменения критической скорости от расстояния между рядами двутавровых элементов

Изменение коэффициента гидравлического сопротивления прямоугольного сепаратора объясняется изменением расстояния между рядами двутавровых

элементов, которое вызвано изменением длины двутавровых элементов. Изменение расстояние между рядами двутавровых элементов производится для достижения максимального значения центробежной силы. В ходе исследования получено уравнение изменения критической скорости W_c от расстояния между рядами двутавровых элементов (рис. 2.34).

После определения критической скорости газового потока, полученные значения эффективности ступеней сепаратора и чисел Стокса были отсортированы на две категории, соответствующие значениям скорости газового потока до и после критической скорости.

В случае, как и с коэффициентом гидравлического сопротивления, значения до критической скорости представляют собой несвязные зависимости, поэтому представлены не будут, так как не поддаются анализу. Значения эффективности ступеней сепаратора и чисел Стокса, соответствующие значениям скорости газового потока после критической скорости представлены на рисунке 2.35.

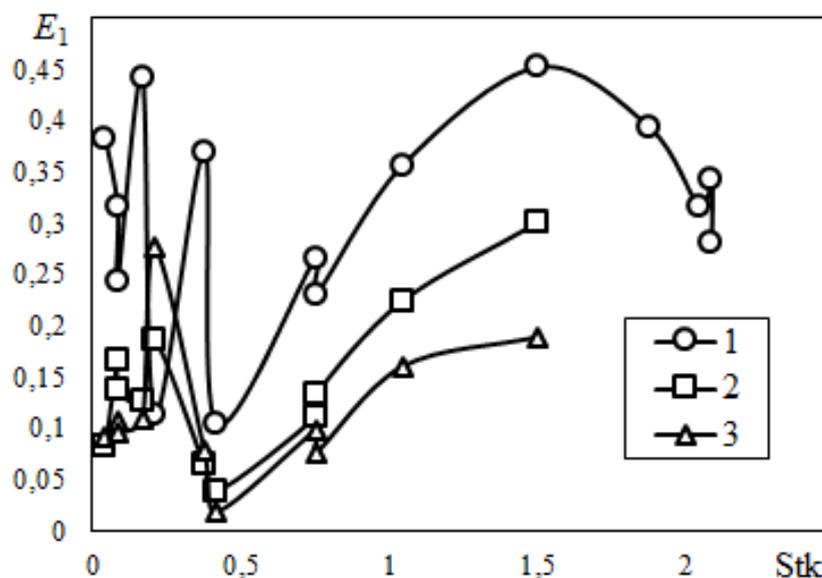


Рисунок 2.35 – Изменение эффективности каждой ступени прямоугольного сепаратора от чисел Стокса при разном количестве рядов двутавровых элементов m : 1 – 3; 2 – 5; 3 – 7

Максимальное и минимальное значения эффективности каждой ступени сепаратора соответствует значениям чисел Стокса равных 1,5 и 0,4

соответственно. Таким образом, можно определить необходимую входную скорость газового потока при конкретном значении длины двутавровых элементов для достижения максимальной эффективности очистки загрязненного газа при минимальном гидравлическом сопротивлении.

Следует отметить, что три линии соответствуют разному количеству рядов двутавровых элементов. В связи с тем, что они не накладываются друг на друга можно сделать вывод, что первый ряд двутавровых элементов также оказывает значимый эффект на очистку газовых выбросов ТЭС в прямоугольном сепараторе (рис. 2.35).

Произведенное исследование показало, что использование прямоугольного сепаратора для дополнительной очистки загрязненного газового потока после циклона способствует интенсификации процесса очистки газовых выбросов. Полученное уравнение зависимости критической скорости от расстояния между рядами двутавровых элементов и зависимость эффективности каждой ступени от чисел Стокса позволяют определять связь между конструктивными и физическими параметрами, влияющими на структуру движения газового потока в прямоугольном сепараторе для достижения максимальной эффективности очистки газовых выбросов ТЭС.

2.8 Оценка вклада центробежных сил при очистке газовых выбросов ТЭС от мелкодисперсных частиц

При проведении исследования задавались следующие неизменные параметры: на выходе из устройства принималось атмосферное давление 101325 Па, начальная скорость частиц в газовом потоке 0 м/с, число частиц, находящихся в газе n принималось равным 1000, плотность газового потока ρ задавалась равной 1,22 кг/м³, кинематическая ν и динамическая μ вязкости газа принималась равными $1 \cdot 10^{-6}$ м²/с и $18,1 \cdot 10^{-6}$ Па·с соответственно. Для получения результатов изменялись следующие параметры: скорость на входе в сепаратор в диапазоне 1 – 15 м/с, диаметр частиц a в газе принимался равным от 1 до 15 мкм. В ходе

исследования изменялись габариты сепаратора, а именно сечение входного патрубка варьировалось от $0,1 \times 0,1$ до $0,4 \times 0,4$ м². Пропорционально изменению габаритов сепаратора изменялись все конструкционные элементы: длина дугообразных элементов вирировалась в диапазоне 12,5 - 50 мм. В ходе исследований число рядов дугообразных элементов внутри сепаратора оставалось неизменным и равным. Исследование производилось при различной производительности сепаратора, которая менялась в диапазоне 0,01 до 2,4 м³/с. Стоит отметить, что для упрощения расчетов, толщину стенок в данном исследовании не учитывали, она задавалась бесконечно малому значению. При численном моделировании задавалось условие прилипания.

Численный расчет проводился при следующих допущениях: процесс течения газового потока стационарен, концентрация пыли исключает взаимодействие между частицами, влияние частиц на движение несущей среды не учитывается.

На входном и выходном патрубках аппарата измерялись значения давления. Вследствие чего был рассчитан коэффициент гидравлического сопротивления ξ сепаратора:

Результаты исследований были представлены графически на рис. 2.36-2.44. Проведенные численные исследования показали, что очистка газового потока от мелкодисперсных частиц размером более 9 мкм производится с эффективностью выше 90 %, а для частиц размером менее 9 мкм степень очистки газа составляет не менее 55 %. При росте входной скорости газового потока увеличивается эффективность улавливания из газового потока частиц пыли размером менее 7 мкм. Для частиц размером более 7 мкм эффективность очистки газа при изменении скорости происходит не существенно. Однако, это справедливо для сепаратора с сечением входного патрубка размерами $0,1 \times 0,1$ м. При увеличении габаритов аппарата степень очистки газа увеличивается для частиц любого размера при росте входной скорости.

Как отмечалось ранее, наибольший вклад в очистку газового потока от мелкодисперсных частиц вносят центробежные силы, однако, они возникают при

огибании газом дугообразные элементы, поэтому можно предположить, что степень очистки газа от частиц пыли двумя рядами дугообразных элементов существенно ниже остальных рядов, потому что в данном случае основными силами, влияющими на очистку газового потока, являются инерционные. Вследствие этого было введено понятие – степень очистки. Степенью очистки сепаратора является площадь ряда дугообразных элементов, где газовый поток очищается под воздействием центробежных сил. Поэтому при вычислении эффективности ступени очистки сепаратора необходимо вычесть первые два ряда дугообразных элементов. Для подтверждения данного предположения были рассчитаны эффективности первых двух рядов E_0 и ступени очистки E_1 .

Эффективность первых двух рядов E_0 определялась по следующей формуле:

$$E_0 = \frac{n_0}{n}, \quad (2.11)$$

где n_0 – число частиц, которые остались на первых двух рядах дугообразных элементах сепаратора.

Эффективность ступени очистки E_1 определялось по следующей формуле:

$$E_1 = 1 - \left(\frac{1 - E}{1 - E_0} \right)^{\frac{1}{m-2}}, \quad (2.12)$$

где m – число рядов дугообразных элементов в сепараторе.

В ходе сравнения эффективностей очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц степенью очистки и первыми двумя рядами дугообразных элементов было выявлено, что степень очищает газ в среднем в 4,5 раза эффективнее, чем первые два ряда элементов при входной скорости газового потока 15 м/с. В среднем эффективность первых двух рядов дугообразных элементов составляет 13,6 %, средняя эффективность каждой ступени очистки составляет 61,8. При увеличении размеров входного сечения патрубка сепаратора с $0,1 \times 0,1$ до $0,4 \times 0,4$ м² эффективность улавливания частиц из газового потока

степенью очистки уменьшается в среднем на 19,1 %. При таких же изменениях размеров сепаратора эффективность первых двух рядов дугообразных элементов уменьшается в среднем на 5 %. Средние эффективности очистки газа степенью очистки от мелкодисперсных частиц при размерах входного сечения патрубка $0,1 \times 0,1$, $0,2 \times 0,2$, и $0,4 \times 0,4$ м² равны 71,1 %, 62,1 % и 52,3 % соответственно (рис. 2.36).

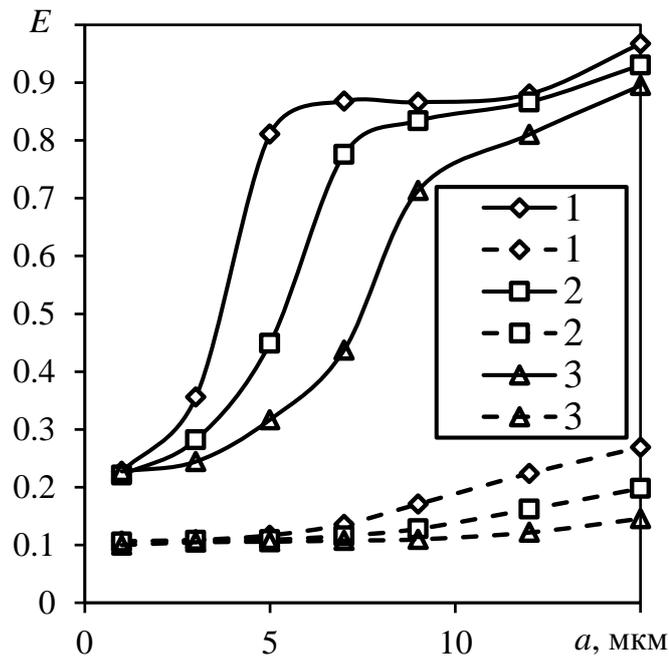


Рисунок 2.36 – Зависимость изменения эффективности очистки газовых выбросов от диаметра мелкодисперсных частиц при входной скорости газового потока 15 м/с и при различных размерах входного патрубка, м²: 1 – $0,1 \times 0,1$; 2 – $0,2 \times 0,2$; 3 – $0,4 \times 0,4$. Линии – эффективность ступени очистки; штрих пунктирные линии – эффективность первых двух рядов дугообразных элементов

Максимальная эффективность очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц сепаратором достигается при значениях чисел Стокса более 1,6. В среднем эффективность очистки газового потока составляет 98,2 % при числах Стокса более 1,6. При значениях чисел Стокса менее 1,6 эффективность существенно падает. Это связано с тем, что данные числа Стокса рассчитывались при неблагоприятных параметрах: относительно маленькие

входные скорости газового потока, большие габариты аппарата и др. Средняя эффективность очистки газа при числах Стокса менее 1,6 равна 69,4 % (рис. 2.37).

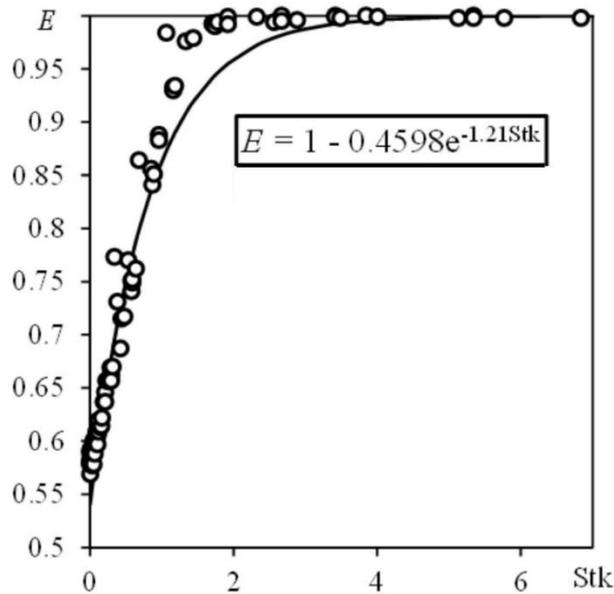


Рисунок 2.37 – Зависимость изменения эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц сепаратором от чисел Стокса

Также были получены зависимости эффективности очистки газа от пыли степенью очистки потока от чисел Стокса и эффективности очистки газового потока первым рядом дугообразных элементов от чисел Стокса (рис. 2.38 и рис. 2.39).

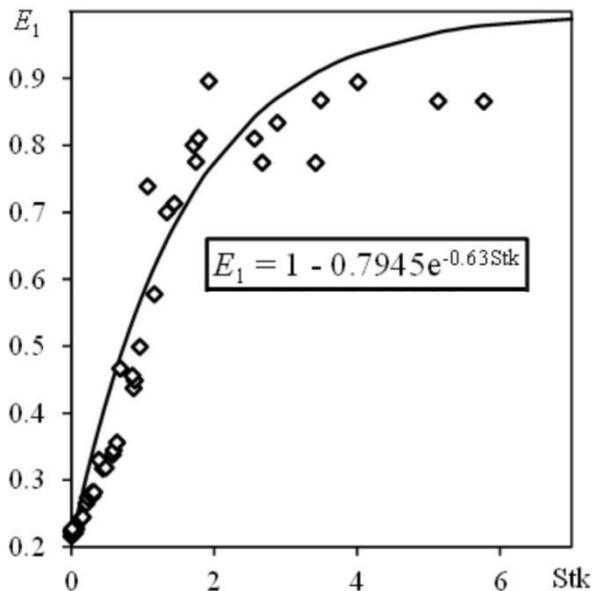


Рисунок 2.38 – Зависимость изменения эффективности очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц степенью очистки сепаратора от чисел Стокса

Максимальная эффективность очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц степенью очистки сепаратора достигается при значениях чисел Стокса более 0,9. При данных значениях чисел Стокса эффективность очистки газовых выбросов ТЭС в среднем равна 77,9 %. При значениях чисел Стокса менее 0,9 эффективность улавливания частиц из газового потока степенью очистки падает до 29,1 % (рис. 2.38).

Практически все значения эффективностей очистки газовых выбросов первыми двумя рядами дугообразных элементов находятся в диапазоне чисел Стокса от 0 до 6. Средняя эффективность очистки газового потока первыми двумя рядами дугообразных элементов для данного диапазона равна 11,4 %. Для чисел Стокса более 6 в среднем эффективность составляет 13,2 %.

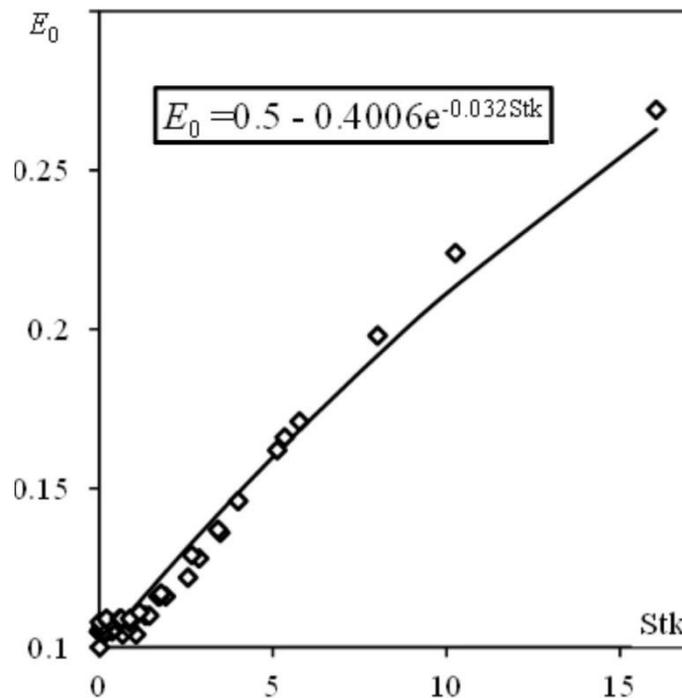


Рисунок 2.39 – Зависимость изменения эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц первыми двумя рядами дугообразных элементов сепаратора от чисел Стокса

Стоит отметить, что полученное уравнение эффективности очистки газа первыми двумя рядами дугообразных элементов от чисел Стокса,

представленного на рисунке 6, отличается от предыдущих уравнений коэффициентом, который равен 0,5. Это связано со следующими факторами: первый ряд перекрывает 50 % площади движения потока газовых выбросов, и первоначально было задано условие прилипания (рис. 2.39).

Коэффициент гидравлического сопротивления сепаратора в среднем равен 3,96. Среднеквадратичная ошибка для данного исследования составила 3,31 % (рис. 2.40).

Также было установлено, что эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц сепаратором составляют более 50 % для частиц размером менее 10 мкм и не менее 99 % для частиц размером более 10 мкм при входной скорости газового потока более 5 м/с. При повышении производительности сепаратора от 0,01 до 2,4 м³/с потери давления увеличивались с 11 до 2277 Па.

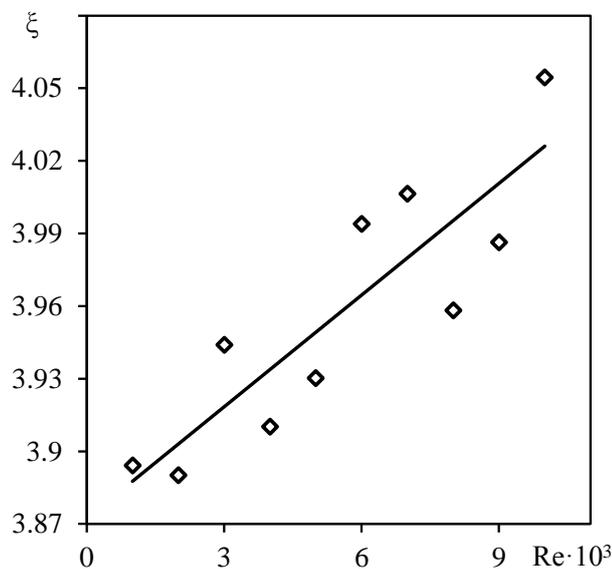


Рисунок 2.40 – Зависимость изменения коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса

При входной скорости потока газовых выбросов в сепаратор 10 м/с эффективности очистки газа от твердых частиц в среднем составили 88,7 %, 84,1 % и 81,8 % для аппаратов с площадями входных патрубков 0,01 м², 0,04 м² и

0,16 м² соответственно. Следует отметить, что увеличение габаритов сепаратора проводило к уменьшению эффективности очистки газовых выбросов ТЭС от твердых частиц. Однако, это справедливо только для частиц размером менее 10 мкм. Особенно заметно это для частиц размером 7 мкм и менее. Например, при изменении площади входного патрубка сепаратора с 0,01 до 0,16 м² эффективность в среднем уменьшается с 80,3 до 66,4 %. Улавливание частиц из газовых выбросов аппаратом размером более 10 мкм производится с эффективностью не менее 99 % для любых габаритов сепаратора в рассматриваемом диапазоне (рис. 2.41).

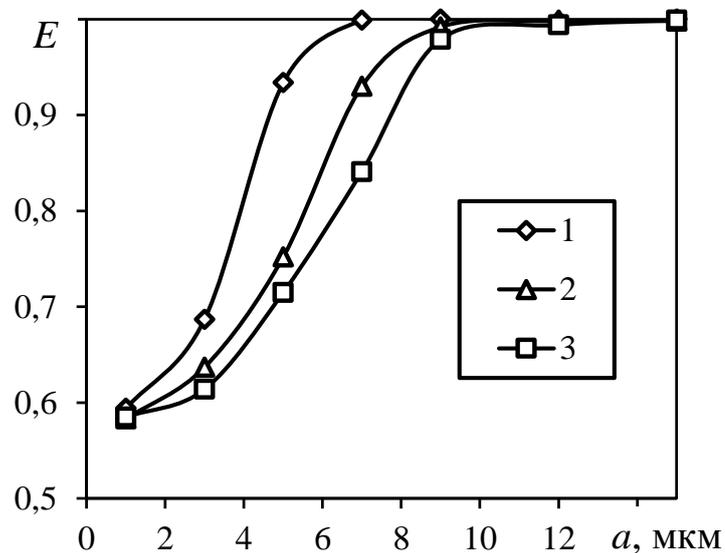


Рисунок 2.41 – Зависимость изменения эффективности очистки газовых выбросов от размера мелкодисперсных частиц при входной скорости газового потока 10 м/с и при различной площади входного сечения патрубка сепаратора, м²:

1 - 0,01; 2 – 0,04; 3 – 0,16

Входная скорость дымовых газов 1 м/с является максимально неэффективной для улавливания частиц из газовых потоков в предлагаемом аппарате с площадью сечения входного патрубка 0,01 м². Для данной скорости эффективность очистки газа от пыли в среднем равна 71,5 % для размера частиц в диапазоне 1 – 15 мкм. При увеличении входной скорости газового потока

происходит увеличение эффективности очистки газа от частиц пыли. Повышение входных скоростей потока дымовых газов с 1 до 5, 10 и 15 м/с позволяет увеличить эффективности очистки газовых выбросов от твердых частиц на 12,8, 17,2 и 19 % соответственно относительно эффективности при скорости 1 м/с. Следует отметить, что разница между эффективностями очистки потока дымовых газов при скоростях 15 и 10 м/с составляет около 1,8 % (рис. 2.42).

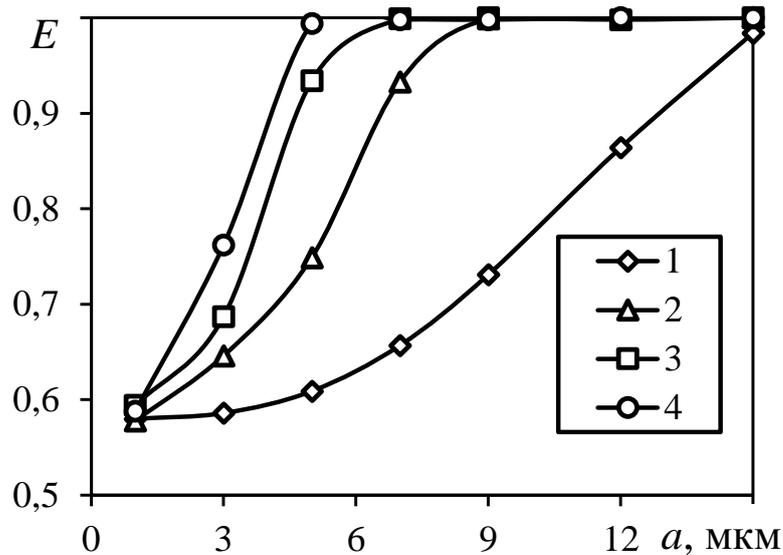


Рисунок 2.42 – Зависимость изменения эффективности очистки газовых выбросов ТЭС от размера мелкодисперсных частиц сепаратором с площадью входного сечения $0,01 \text{ м}^2$ при различных входных скоростях потока дымовых газов, м/с: 1 – 1; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15

При увеличении площади сечения входного патрубка сепаратора до $0,04 \text{ м}^2$ средние эффективности очистки газовых выбросов от твердых частиц размером 1 – 15 мкм при входных скоростях газового потока 1, 5, 10 и 15 м/с составляют 66,6, 78,1, 84,1 и 86,8 % соответственно (рис. 2.43).

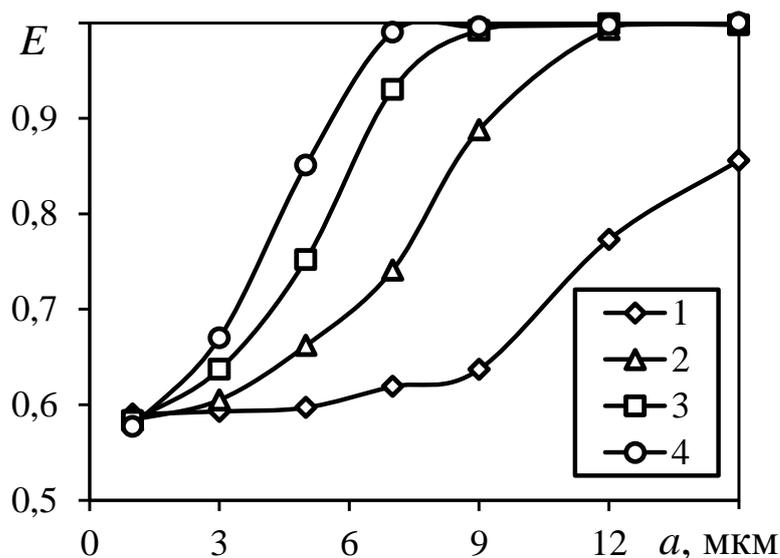


Рисунок 2.43 – Зависимость изменения эффективности очистки газовых выбросов от размера мелкодисперсных частиц сепаратором с площадью входного сечения $0,04 \text{ м}^2$ при различных входных скоростях потока дымовых газов, м/с:

1 – 1; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15

При площади входного сечения сепаратора $0,16 \text{ м}^2$ эффективность очистки газовых выбросов ТЭС от твердых частиц существенно падает при входной скорости потока дымовых газов 5 м/с относительно этой же скорости в аппаратах меньших габаритов. Средние значения эффективности очистки составляют $60,4$, $71,1$, $77,9$ и $81,8 \%$ при входных скоростях потока дымовых газов 1 , 5 , 10 и 15 м/с соответственно (рис. 2.44).

Таким образом, увеличение габаритов сепаратора приводит к уменьшению эффективности очистки газовых выбросов ТЭС от мелкодисперсных частиц вследствие уменьшения влияния входной скорости газового потока на процесс очистки. Поэтому наиболее рациональным подходом по повышению эффективности улавливания частиц из дымовых газов при относительно больших габаритах аппарата является увеличение значения входной скорости газового потока дымовых газов. Однако, при увеличении входной скорости повышаются энергетические затраты на процесс очистки, поэтому необходимо определять наиболее оптимальное отношение между эффективностью очистки дымовых газов от мелкодисперсных частиц и входной скоростью потока дымовых газов.

Например, проведенные исследования показали, что разница между эффективностями очистки газовых выбросов от мелкодисперсных твердых частиц составляет не более 4 % при изменении входной скорости потока дымовых газов с 10 до 15 м/с при разных площадях сечений входного патрубка сепаратора в диапазоне 0,01-0,16 м².

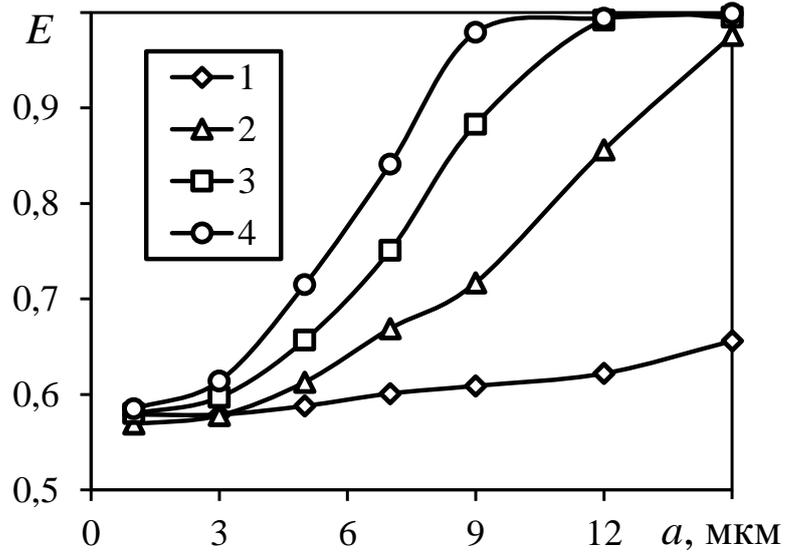


Рисунок 2.44 – Зависимость изменения эффективности очистки газовых выбросов от размера мелкодисперсных частиц сепаратором с площадью входного сечения 0,16 м² при различных входных скоростях потока дымовых газов, м/с:

1 – 1; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15.

В ходе проделанной работы была получена компьютерная модель, позволяющая производить оценочный расчет процессов очистки газовых выбросов ТЭС от твердых частиц разработанным сепаратором.

Проведенные исследования подтвердили, что в разработанном аппарате преобладает действие центробежных сил, которые вносят наибольший вклад, чем другие силы: инерционные, электростатические и др. при очистке дымовых газов ТЭС от мелкодисперсных частиц. Получены уравнения эффективностей очистки газовых выбросов от чисел Стокса и коэффициента гидравлического сопротивления от чисел Рейнольдса, позволяющие при их совместном решении рассчитать необходимую входную скорость потока дымовых газов при

конкретном значении длины дугообразных элементов для достижения максимальной эффективности очистки газовых выбросов ТЭС от твердых частиц при минимальном гидравлическом сопротивлении или проделать данный расчет в обратном направлении.

Таким образом, были получены уравнения 2.13-2.15, которые в совокупности позволяют рассчитать сепаратор с дугообразными элементами.

$$E = 1 - 0.4598e^{-1.21Stk}; \quad (2.13)$$

$$E_0 = 0.5 - 0.4006e^{-0.0327Stk}; \quad (2.14)$$

$$E_1 = 1 - 0.7945e^{-0.6304Stk}. \quad (2.15)$$

На основе полученных зависимостей, представленных выше, было исследовано изменение потери давления в аппарате при различных входных скоростях потока дымовых газов. Следует отметить, что для получения выборки данных, которые позволят подобрать оптимальные технологические и геометрические размеры сепаратора для высокоэффективной очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц, при умеренном гидравлическом сопротивлении, варьировались следующие параметры: диаметр частиц и плотность в диапазоне 1-10 мкм и 700-7000 кг/м³ соответственно. Такой диапазон размеров частиц обусловлен тем, что аппараты первой ступени - грубой очистки, очищают газ от них с низкой эффективностью. Выбранная плотность является наиболее характерной для дисперсной фазы частиц в газовых выбросах на энергетических предприятиях, использующих твердое топливо, и тепловых электрических станциях. Также задавались эффективность E очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц из диапазона 0,9-0,99 и входная скорость потока дымовых газов из диапазона 4-20 м/с. Для получения зависимостей один из варьирующихся параметров изменялся, а остальные принимались равными постоянным значениям. Постоянные значения: диаметр частиц – 4 мкм, плотность частиц – 1000 кг/м³ и эффективность очистки газа – 0,95. Также в ходе

исследования принимались постоянными следующие теплофизические и физические параметры: динамическая вязкость газа $\mu = 18,1 \cdot 10^{-6}$ Па·с, плотность газового потока $\rho = 1,28$ кг/м³ и объемный расход газового потока $Q = 0,31$ м³/с.

В ходе исследования, исходя из изменяющихся и постоянных параметров, рассчитывались размеры входного сечения сепаратора, диаметр дугообразных элементов и определялось количество элементов в ряду. Входное сечение сепаратора – квадратное, поэтому ширина и высота были одинаковыми.

Сторона входного сечения сепаратора B , мм определялась по следующей формуле:

$$B = \sqrt{\frac{Q}{W}}. \quad (2.16)$$

Диаметр дугообразных элементов b , мм рассчитывался по выражению:

$$b = \frac{B}{2n_b}, \quad (2.17)$$

Результаты исследований были представлены графически на рис. 2.45-2.47.

Проведенные численные исследования показали, что чем выше требования к очистке газовых выбросов от мелкодисперсных частиц, тем выше энергетические затраты на соответствующий процесс. Потери давления в сепараторе при очистке газовых выбросов от мелкодисперсных частиц увеличиваются при следующих факторах: при уменьшении плотности частиц, при уменьшении диаметра частиц и при увеличении эффективности очистки газа.

Увеличение плотности частиц приводит к снижению потери давления в аппарате, вследствие того, что при росте плотности частиц очистка газовых выбросов от них упрощается, так как при неизменном размере частиц увеличение их плотности приводит к увеличению массы частиц. Чем выше масса частиц, тем легче их выбить из структурированного потока газа при огибании дугообразных элементов (рис. 2.45).

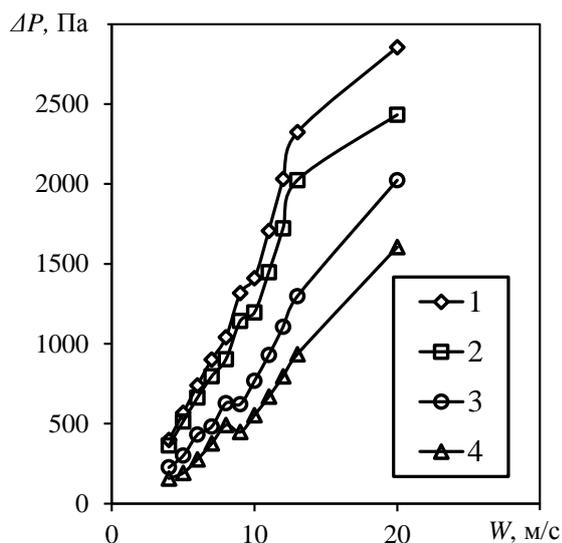


Рисунок 2.45 – Зависимость изменения потери давления в сепараторе от входной скорости потока дымовых газов при различных значениях плотности частиц, кг/м³: 1 – 700; 2 – 1000; 3 – 3000; 4 – 7000

Результаты исследований показали, что в среднем при скорости потока дымовых газов от 4 до 20 м/с потери давления в сепараторе составляют 1273, 1100, 733 и 541 Па при плотности частиц 700, 1000, 3000 и 7000 кг/м³ соответственно. Стоит отметить, что увеличение входной скорости потока дымовых газов приводит к повышению потери давления в аппарате. При входной скорости потока дымовых газов 4 – 5 м/с потери давления в сепараторе в среднем составляют 482, 438, 262 и 174 Па для частиц с плотностью 700, 1000, 3000 и 7000 кг/м³ соответственно. Повышение входной скорости газа до 6-9 м/с приводит к увеличению потери давления в аппарате в среднем до 999, 875, 540 и 397 Па при плотности частиц 700, 1000, 3000 и 7000 кг/м³ соответственно. При более высоких скоростях потока дымовых газов 10 – 15 м/с потери давления в сепараторе составляют в среднем 1867, 1597, 1024 и 737 Па для частиц с плотностью 700, 1000, 3000 и 7000 кг/м³ соответственно. Таким образом, анализ параметров частиц, в особенности их плотности, которые содержатся в дымовых газах ТЭС, могут существенно повлиять на снижение энергетических затрат. В связи с тем, что будет возможен подбор оптимальной входной скорости потока дымовых газов, что существенно снизит потери давления в аппарате (рис. 2.46).

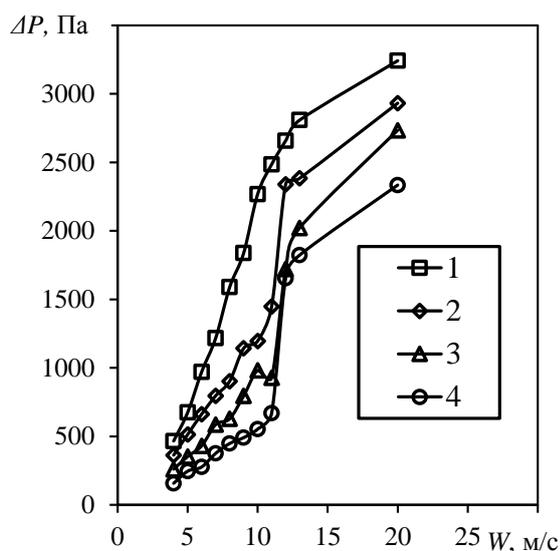


Рисунок 2.46 – Зависимость изменения потери давления в сепараторе от входной скорости потока дымовых газов при различных значениях диаметрах частиц, мкм:

1 – 2; 2 – 4; 3 – 6; 4 – 10

Потери давления в сепараторе увеличиваются при уменьшении диаметра частиц. Это объясняется тем, что чем меньше частицы, тем сложнее их выбить из структурированного потока дымовых газов при огибании им дугообразные элементы (рис. 2.47).

Результаты исследований показали, что в среднем при скорости потока дымовых газов от 4 до 20 м/с потери давления в сепараторе составляют 1684, 1223, 953 и 752 Па при диаметре частиц 2, 4, 6 и 10 мкм соответственно. Как и в исследовании, проиллюстрированном на рисунке 2.46, большое значение на потери давление оказывает входная скорость потока дымовых газов. При относительно небольших скоростях движения дымовых газов потери давления умеренные, а их рост приводит к существенному увеличению потери давления в сепараторе. Так при входной скорости потока дымовых газов 4-5 м/с потери давления в сепараторе в среднем составляют 570, 438, 306 и 201 Па для частиц диаметром 2, 4, 6 и 10 мкм соответственно. Увеличение скорости газа до 6-9 м/с приводит к повышению потери давления в аппарате в среднем до 1403, 875, 609 и 397 Па при диаметре частиц 2, 4, 6 и 10 мкм соответственно. При более высоких

входных скоростях потока дымовых газов 10-15 м/с наблюдается увеличение потери давления в сепараторе до 2554, 1506, 1077 и 737 Па при диаметре частиц 2, 4, 6 и 10 мкм соответственно (рис. 2.46).

Повышение эффективности очистки потока дымовых газов от мелкодисперсных частиц приводит к увеличению потери давления в аппарате. Так при входных скоростях газового потока 4 – 20 м/с потери давления в сепараторе составляют в среднем 969, 1097 и 1453 Па при эффективности очистки газа 0,9, 0,95 и 0,99 соответственно.

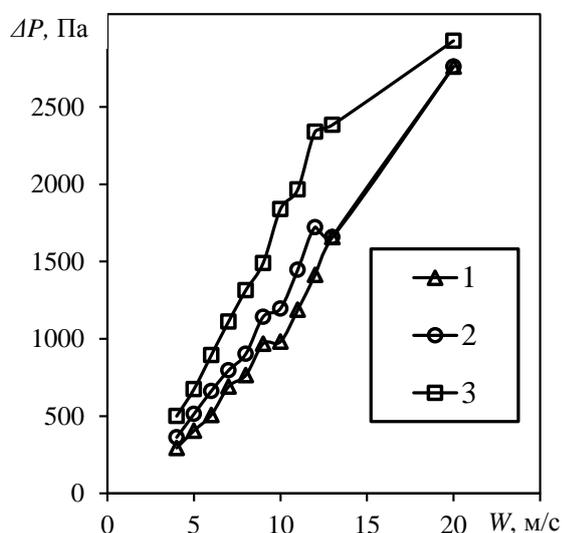


Рисунок 2.47 – Зависимость изменения потери давления в сепараторе от входной скорости потока дымовых газов при различных значениях эффективности очистки дымовых газов ТЭС от мелкодисперсных частиц:

1 – 0,9; 2 – 0,95; 3 – 0,99

При входной скорости потока дымовых газов до 10 м/с потери давления в среднем составляют 605, 729 и 997 Па для эффективностей очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц 0,9, 0,95 и 0,99 соответственно, а при скоростях 10 – 15 м/с потери давления составляют 1310, 1506 и 2132 Па для эффективностей 0,9, 0,95 и 0,99 соответственно (рис. 2.47).

Таким образом, проведенные исследования показали, что для минимизации энергетических затрат, требуемых на процесс очистки газовых выбросов от

мелкодисперсных частиц, наиболее оптимальными входными скоростями потока дымовых газов являются 10 м/с и менее.

Полученные уравнения (2.13–2.17) позволили расчетным путем продемонстрировать, что потери давления в сепараторе существенно изменяются в зависимости от входной скорости потока дымовых газов и параметров частиц: плотности и их диаметров. Исследования показали, что применение сепаратора в технологической схеме очистки газа от мелкодисперсных частиц после аппаратов грубой очистки способно обеспечить очистку газовых выбросов ТЭС с эффективностью не менее 0,9 от частиц размером менее 10 мкм при потере давления в аппарате не более 1000 – 1450 Па.

2.9 Сравнение предлагаемого прямоугольного сепаратора с циклоном

В литературном обзоре был сделан вывод, что наиболее распространенными очистительными аппаратами в промышленности являются циклоны. Вследствие этого был произведен сравнительный анализ между предлагаемым прямоугольным сепаратором и циклоном по эффективности улавливания мелкодисперсных частиц и по гидравлическому сопротивлению. В качестве циклона была выбрана одна из самых применяемых моделей - циклон ЦН – 11 – 400 без улитки.

Сравнительный анализ проводился с использованием программного модуля ANSYS Fluent. Для данной задачи использовался метод конечных элементов.

Для проведения сравнительного анализа циклона и прямоугольного сепаратора по эффективности улавливания частиц и по гидравлическому сопротивлению, аппараты сравнивались при следующих одинаковых параметрах: площадь входного патрубка, входной объемный расход Q , м³/с, термодинамические параметры окружающей среды – давление и температура, одинаковые теплофизические свойства рабочего тела – воздуха и частиц, находящихся в нем.

Входной патрубок циклона ЦН – 11 - 400 имеет прямоугольную форму

высотой 192 мм и шириной 104 мм, который присоединяется к линии подачи воздуха, по которому движется запыленный газ с объемным расходом Q , м³/с. Вследствие этого прямоугольный сепаратор получил такие же геометрические размеры внешнего корпуса, как и у циклона ЦН – 11 – 400. При исследованиях принималось, что сепаратор присоединяется к линии подачи воздуха, заменяя циклон. Таким образом, движущийся многофазный поток дымовых газов входил в сепаратор через входной патрубок 1, по мере движения газа внутри сепаратора, обтекая и контактируя с двутавровыми элементами, газ очищался и выходил из устройства через выходной патрубок 4 (рис 2.48).

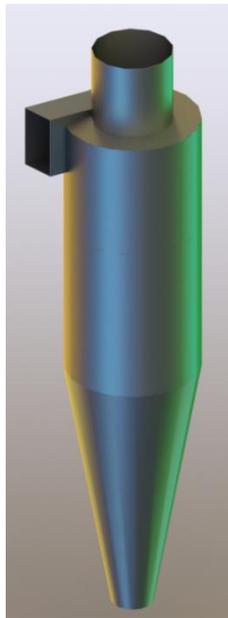


Рисунок 2.48 – 3D модель циклона ЦН – 11 – 400

Созданная 3D модель циклона ЦН – 11 – 400 для численных исследований представлена на рисунке 2.48.

Для получения зависимостей изменялся объемный входной расход Q и диаметр частиц a , мкм. Давление на выходе из аппаратов принималось нормальным равным 101325 Па. Число частиц n , находящихся в газе принималось равным 1000.

Прямоугольный сепаратор с конструкционными параметрами $k = 0,25$, $L = 8,125$ мм, улавливает в среднем на 52 % мелкодисперсных частиц до 6 мкм

больше, чем циклон ЦН – 11 - 400 при входном объемном расходе потока дымовых газов $Q = 0,444 \text{ м}^3/\text{с}$, при диаметре частиц более 9 мкм эффективность улавливания мелкодисперсных частиц обоих аппаратов практически одинакова 99,7 – 100 % (рис 2.49).

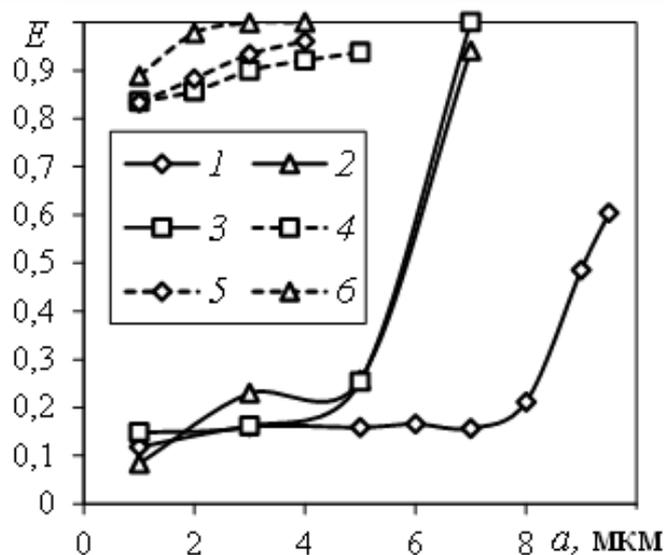


Рисунок 2.49 – Зависимость эффективности улавливания мелкодисперсных частиц от их диаметра при разных входных объемных расходах Q , $\text{м}^3/\text{с}$:
 1 – 0,222, 2 – 0,444, 3 – 0,888, 4 – 0,05, 5 – 0,111, 6 – 0,444;
 штрих пунктирные линии – значения расчета прямоугольного сепаратора,
 линии – значения расчета циклона

Однако существенным недостатком прямоугольного сепаратора является большие значения потерь давления при больших значения объемного расхода, например, при $Q = 0,444 \text{ м}^3/\text{с}$ потери давления у сепаратора в 41,81 раз больше, чем у циклона, что категорически неприемлемо, но по мере уменьшения объемного расхода на входе в сепаратор значения потерь давления сравниваются со значениями у циклона и при малом расходе $Q = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ оказываются ниже, чем у циклона.

При малых значениях объемного расхода Q гидравлическое сопротивление циклона также уменьшается, однако это приводит к существенному снижению

эффективности улавливания частиц любого диаметра, поэтому на практике применяют батарейные циклоны, что в свою очередь приводит к увеличению габаритов, массы аппаратов и их экономической стоимости. Для снижения гидравлических потерь давления в прямоугольном сепараторе, при высоких значениях объемного расхода, предлагается собирать несколько сепараторов в один корпус и использовать данную конструкцию на примере батарейных циклонов. Тогда для замены 1 циклона ЦН – 11 при $Q = 0,444 \text{ м}^3/\text{с}$ потребуется 9 прямоугольных сепараторов, которые необходимо использовать при $Q = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$. Данное оформление прямоугольных сепараторов позволит получить гидравлическое сопротивление на 52 Па ниже, чем у циклона ЦН – 11 и повысить эффективность улавливания мелкодисперсных частиц в 2-3 раза. Изменение эффективности прямоугольного сепаратора при различных значениях объемного расхода была рассмотрена в ранее проведенных исследованиях. Данные исследования показали, что уменьшение объемного расхода с 0,444 до 0,05 $\text{м}^3/\text{с}$ снижают эффективность сепаратора в среднем на 4 %.

Таким образом сравнительным анализ показал, что использование прямоугольного сепаратора намного эффективнее циклона при улавливании мелкодисперсных частиц до 10 мкм. Для частиц более 10 мкм эффективность обоих аппаратов равна практически 100 %. Гидравлическое сопротивление прямоугольного сепаратора меньше, чем у циклона при небольших значениях входного объемного расхода.

Таким образом, сепаратор в перспективе может рассматриваться как аппарат для грубой очистки газовых выбросов.

2.10 Оценочная методика расчета эффективности прямоугольного сепаратора

Предлагается оценочная методика расчета эффективности прямоугольного сепаратора, основанная на решении относительно простых уравнений.

Расчетная схема ступени приведена на рисунке 2.50.

Предполагается, что сепаратор будет улавливать частицы небольшого

диаметра, поэтому их смещением за счет силы тяжести можно пренебречь и использовать двухмерную модель движения частицы в полярных координатах:

$$\begin{aligned}\frac{dU_r}{d\tau} &= \frac{U_\varphi^2}{r} + \frac{3\rho_G}{4\rho_L} c_a \frac{|U_r|}{a} (-U_r), \\ \frac{dU_\varphi}{d\tau} &= -\frac{U_r U_\varphi}{r} + \frac{3\rho_G}{4\rho_L} c_a \frac{|W_\varphi - U_\varphi|}{a} (W_\varphi - U_\varphi), \\ \frac{dr}{d\tau} &= U_r, \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{U_\varphi}{r}.\end{aligned}\quad (2.18)$$

где U_r , U_φ – радиальная и тангенциальная скорости, м/с; τ – время полета капли, с; r – текущий радиус рабочей зоны на ступени, м.

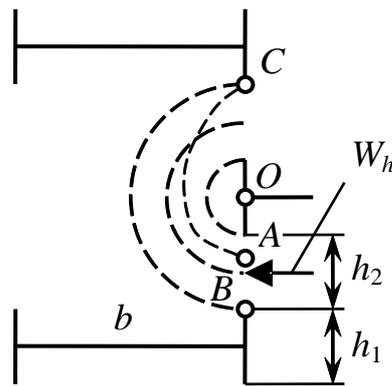


Рисунок 2.50 – Расчетная схема ступени прямоугольного сепаратора.

В описании принимаются следующие допущения: пренебрегается осевой скоростью газа и влиянием частиц на структуру потока газа из-за их малой концентрации.

Для расчета тангенциальной скорости обычно используется зависимость:

$$W_\varphi = W_h (r/r_{cp})^n \quad (2.19)$$

где $r_{cp} = (h_1 + h_2)/2$ – средний радиус, м.

Для решения системы уравнений используются начальные условия: $U_r(0) = 0$; $U_\phi(0) = 0$; $\phi(0) = -\pi/2$; $r = r_0$. Начальный радиус, на котором располагается частица, выбирается из условия осаждения частицы на верхней грани (в точке С рис. 2.50).

Коэффициент аэродинамического сопротивления c_a рассчитывался по формуле:

$$c_a = \frac{24}{\text{Re}_a} + \frac{4}{\sqrt[3]{\text{Re}_a}}, \quad (2.20)$$

где $\text{Re}_a = U_{om} a / \nu_G$ – число Рейнольдса для частицы, a – диаметр частицы, м, ν_G – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Точка С (рис. 2.50) совпадает с нижней точкой элемента прямоугольного сепаратора и соответствует концу траектории частицы, вылетающей из точки А. Эффективность сепарации частиц, определяется исходя из предположения, что частицы, вылетающие ниже начального радиуса, улавливаются ступенью сепаратора, а остальные частицы улетают на следующую ступень. Исходя из этого предположения эффективность сепарации частиц на одной ступени:

$$E = G_1 / G_0. \quad (2.21)$$

где G_0 – расход газа, проходящий через одну сторону ступени сепаратора, $\text{м}^3/\text{с}$; G_1 – расход газа, в котором частицы улавливаются, $\text{м}^3/\text{с}$.

Расход газа, проходящий через одну сторону ступени сепаратора можно определить:

$$G_0 = x \int_{h_1/2}^{h_1/2+h_2} W_\phi(z) dz. \quad (2.22)$$

С учетом формулы (2.19)

$$G_0 = \frac{x W_{cp}}{r_{cp}^n (n+1)} \left(\left(\frac{h_1}{2} + h_2 \right)^{n+1} - \left(\frac{h_1}{2} \right)^{n+1} \right) \quad (2.23)$$

где x – высота участка, м.

Аналогично определяется расход газа, в котором частицы улавливаются

$$G_1 = \frac{xW_{cp}}{r_{cp}^n(n+1)} \left(\left(\frac{h_1}{2} + h_2 \right)^{n+1} - r_{тек}^{n+1} \right) \quad (2.24)$$

Тогда эффективность можно определить по соотношению

$$E = \left| \frac{(h_1/2 + h_2)^{n+1} - r_{тек}^{n+1}}{(h_1/2 + h_2)^{n+1} - (h_1/2)^{n+1}} \right| \quad (2.25)$$

Для оценочных расчетов можно принять $n = 1$, согласно проведенным ранее расчетам в прикладных программах. Следовательно, можно записать:

$$E = \frac{h_1^2 + 4h_1h_2 + 4h_2^2 - 4r^2}{4h_2(h_1 + h_2)} \quad (2.26)$$

В результате расчетов получены зависимости эффективности от геометрических размеров рабочей зоны.

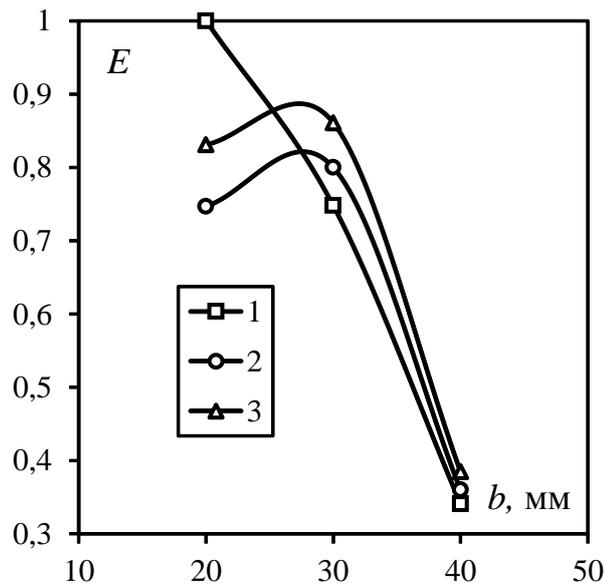


Рисунок 2.51 – Зависимость эффективности сепаратора от ширины элемента b , при $W_{cp} = 10$ м/с, $a = 10$ мкм, h_1 , мм: 1 – 3; 2 – 5; 3 – 7.

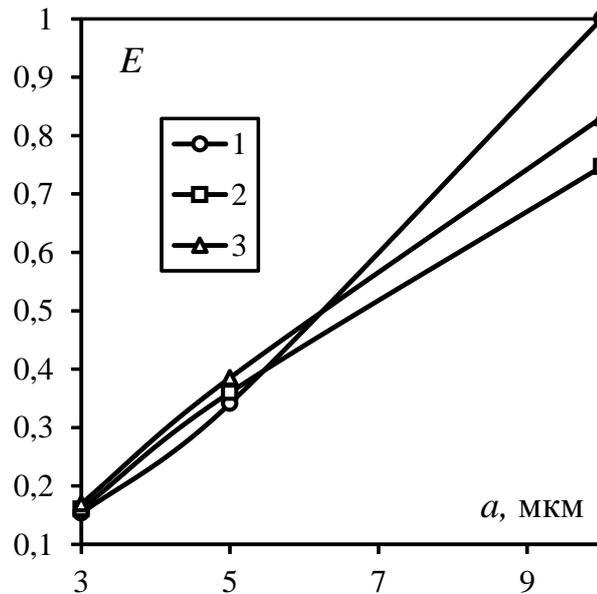


Рисунок 2.52 – Зависимость эффективности сепаратора от диаметра частицы при $W_{cp} = 10$ м/с, $b = 20$ мм, h_1 , мм: 1 – 3; 2 – 5, 3 – 7.

При небольших значениях размера h_1 эффективность убывает при всех значениях ширины ступени (рис. 2.51). Столь существенное снижение объясняется увеличением расхода той части газа, из которой частицы не успевают осесть. Центробежная сила возрастает, но увеличивается и длина траектории, по которой движется частица. С увеличением h_1 на зависимости появляется локальный максимум. Причем значения ширины ступени, при котором он наблюдается примерно одинаковые.

Как и во всех подобных устройствах, при увеличении диаметра частицы эффективность улавливания повышается (рис. 2.52). При улавливании частиц диаметром менее 6 мкм эффективность улавливания практически не зависит от значения размера h_1 . При улавливании более крупных частиц эффективность больше у сепараторов с $h_1 = 3$ мм.

Было обнаружено, что до значения $h_1/b < 0,23$ эффективность не зависит от среднерасходной скорости газа. Эффективность равна 1 в диапазоне $0,15 < h_1/b < 0,23$. При значениях $h_1/b < 0,15$ эффективность возрастает практически по линейной зависимости. Предложенная методика может использоваться для оценочных расчетов эффективности при подборе оптимальных значений геометрических размеров прямоугольных сепараторов.

Глава 3 Экспериментальные исследования улавливания мелкодисперсных твердых частиц сепаратором с прямоугольными элементами

3.1 Улавливание аэрозолей в сепараторе с прямоугольными элементами

Для создания физической модели экспериментальной установки прямоугольного очистительного сепаратора был задействован 3D принтер. 3D модель сепаратора была создана в программном комплексе КОМПАС – 3D (рис. 3.1).

Геометрические размеры для двутавровых элементов прямоугольного сепаратора подбирались из полученных результатов во 2 главе, а именно:

- 1) Длина корпуса сепаратора 107 мм;
- 2) Высота корпуса сепаратора 52 мм;
- 3) Ширина корпуса сепаратора 50 мм;
- 4) Толщина стенки корпуса сепаратора 1 мм;
- 5) Длина двутавровых элементов 14 мм;
- 6) Длина выступов двутавровых элементов 3,8 мм;
- 7) Толщина двутавровых элементов 1 мм;
- 8) Расстояние между рядами двутавровых элементов 5 мм;
- 9) Количество рядов двутавровых элементов – 4;
- 10) Количество двутавровых элементов в одном ряду – 4 (рисунок 3.2).

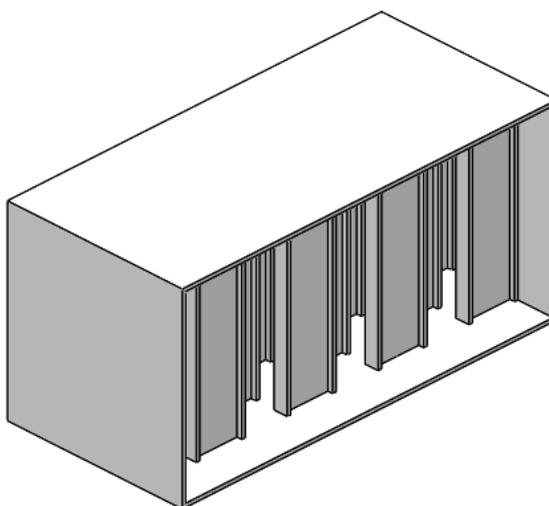


Рисунок 3.1 – 3D модель очистительного прямоугольного сепаратора

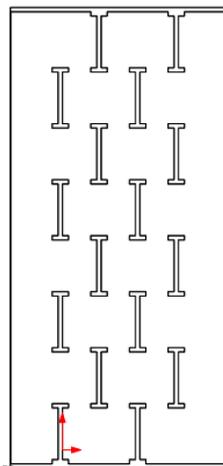


Рисунок 3.2 – 2D модель очистительного прямоугольного сепаратора (вид сверху)

В качестве материала был выбран пластик ABS. ABS - пластик (акрилонитрилбутадиенстирол, АБС) – ударопрочный термопластик, завоевавший высокую популярность в промышленности и в аддитивном производстве.

Отличные механические и физические свойства ABS-пластика обуславливают возможность применения этого материала для создания всевозможных объектов, имеющих практическую ценность. ABS-пластик широко применяется в автомобильной, медицинской и сувенирной промышленности, в производстве спортивного инвентаря, сантехники, банковских карт, мебели, игрушек и др.

Печать прямоугольного сепаратора продемонстрирована на рисунке 3.3.

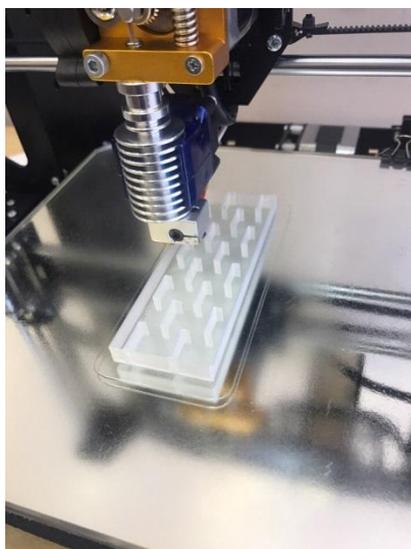


Рисунок 3.3 – Печать прямоугольного сепаратора с помощью 3D принтера

Для печати прямоугольного сепаратора был задействован 3D принтер «Prusa i3 Steel» (рис 3.4).

Таблица 3.1 – Технические характеристики ABS пластика

Температура стеклования	Около 105°С
Прочность на изгиб	41 МПа
Предел прочности на разрыв	22 МПа
Модуль упругости при растяжении	1627 МПа
Относительное удлинение	6%
Усадка при охлаждении	До 0,8%
Плотность материала	Около 1050 кг/м ³

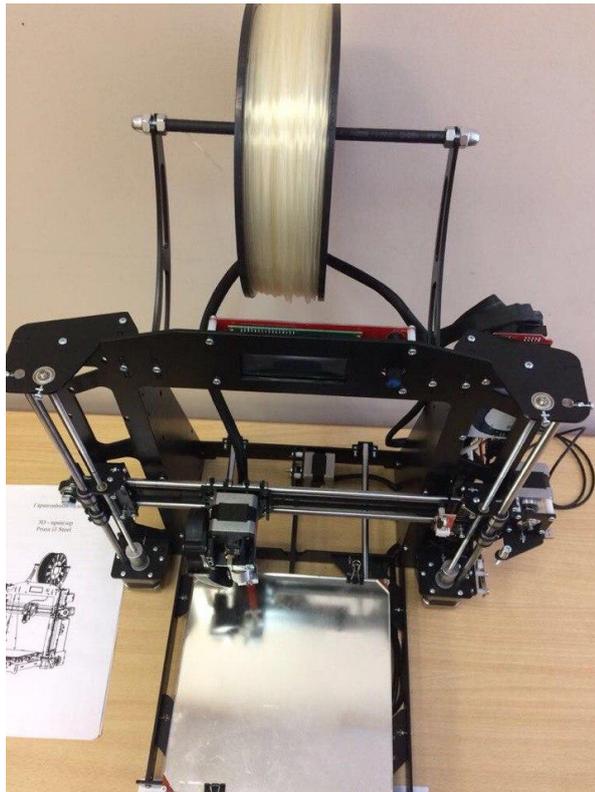


Рисунок 3.4 – 3D принтер «Prusa i3 Steel»

Относительно невысокая стоимость ABS-пластика и сравнительная легкость использования в качестве расходного материала привели к высокой популярности ABS пластика.

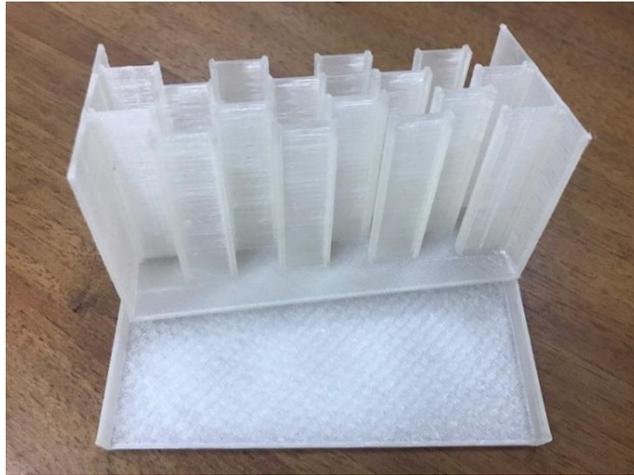


Рисунок 3.5 – Распечатанная модель прямоугольного сепаратора

Стоит отметить, что распечатанная модель сепаратора из данного материала имеет следующие достоинства: влагостойкость; кислотостойкость; маслостойкость; относительно высокая теплостойкость, достигающая 115 °С; повышенная ударпрочность; высокая эластичность; высокая долговечность в отсутствие прямого солнечного света; легко поддается механической обработке. Технические характеристики ABS пластика приведены в таблице 3.1

Прямоугольный сепаратор был распечатан таким образом, чтобы была возможность его разборки, позволяющая рассмотреть изменение поверхностей двуглавровых элементов после продувки потока дымовых через сепаратор (рис 3.5).

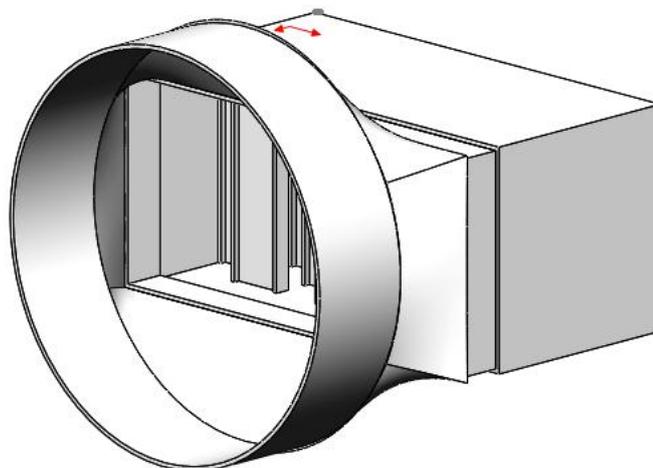


Рисунок 3.6 – 3D модель переходника, подключенного к прямоугольному сепаратору

Для проведения эксперимента дополнительно была создана модель переходника от сепаратора к нагнетателю газового потока (рис 3.6).

На рисунке 3.7 представлена экспериментальная установка прямоугольного сепаратора без верхней крышки (вид сверху).

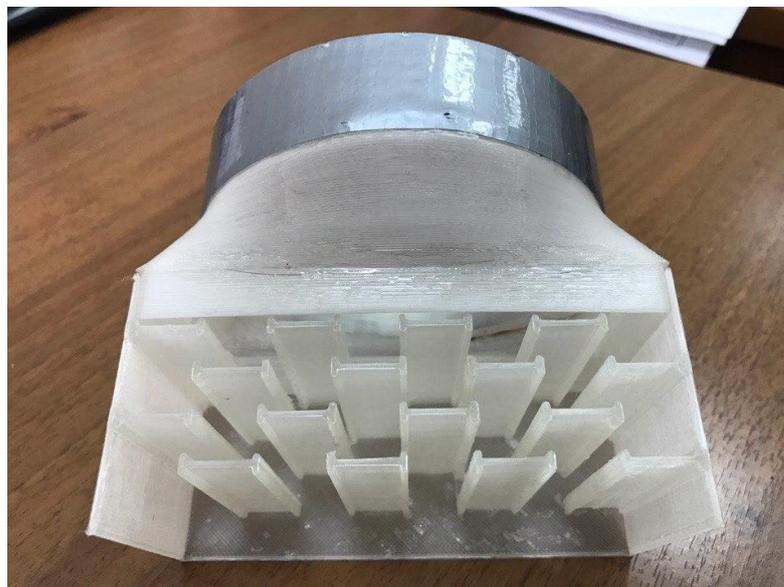


Рисунок 3.7 – Прямоугольный сепаратор

В связи со сложностью оценки эффективности улавливания мелкодисперсных частиц пыли до 10 мкм данным прямоугольным сепаратором, в связи с ограниченностью комплектующих: порошка, состоящего из мелкодисперсных частиц до 10 мкм и фильтра, способного улавливать данные частицы на 100 %, который необходимо было установить после прямоугольного сепаратора для фиксирования массовой доли частиц, которые не были пойманы сепаратором было решено улавливать мелкодисперсные жидкие капли, которые создавались в емкости с водой и далее продувались через сепаратор, при этом масса емкости воды и сепаратора взвешивались с помощью точных весов с погрешностью 0,01 г. Стоит отметить, что мелкодисперсные твердые и жидкие частицы прилипают к стенкам элементам одинаково. Практически во всех расчетах при исследовании оседании мелкодисперсных твердых частиц к поверхностям стенкам данные частицы рассматриваются как жидкие, иными

словами при контакте таких частиц с любой поверхностью стенки происходит прилипание частиц к поверхности.

Для оценки уловленных мелкодисперсных капель жидкости в ней была разведена соль, которая оставалась в прямоугольном сепараторе после проведения эксперимента и оставляла следы на поверхностях двутавровых элементов.

Таким образом, для проведения эксперимента в емкости с водой была разведена соль в концентрациях 20 г соли на 100 мл воды, с помощью электрического туманообразователя, помещенного в емкость с водой, образовывался туман, состоящий из мелкодисперсных капель размером в диапазоне 1 – 30 мкм (рис. 3.8), к емкости с водой подносился прямоугольный сепаратор, который обратной стороной при помощи переходника подключался к нагнетателю воздуха, работающего на всасывающем режиме (рис. 3.9). При включении нагнетателя воздуха, образующейся туман в емкости, всасывался через прямоугольный сепаратор, который проходил через 4 ряда двутавровых элементов. При этом масса емкости с водой и масса сепаратора взвешивались до и после эксперимента.



Рисунок 3.8 – Образование тумана с помощью электрического туманообразователя



Рисунок 3.9 – Подключение сепаратора к нагнетателю воздуха и к емкости с водой

После проведения эксперимента масса прямоугольного сепаратора увеличилась на 1,12 г, при этом масса емкости с водой уменьшилась на 5,65 г. Учитывая, что на 1 г соли приходится примерно 5 мл воды, можно сделать вывод, что данный прямоугольный сепаратор позволил уловить до 99,9 % мелкодисперсных жидких частиц, образованных туманообразователем, размером в диапазоне 1 – 30 мкм.

На рисунке 3.10 представлены следы соли на стенках двутавровых элементов после проведения эксперимента. С помощью программного комплекса Adobe Photoshop было установлено, что практически все частицы имеют размер в диапазоне до 18 мкм.

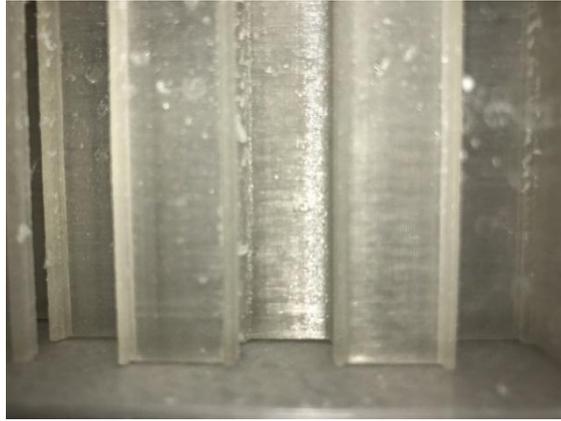


Рисунок 3.10 – Следы поваренной соли на стенках двутавровых элементов

3.2 Улавливание мелкодисперсного материала сепаратором

В качестве мелкодисперсной пыли использовался измельченный мел до размеров частиц преимущественно 2 мкм.

На рисунке 3.11 представлена экспериментальная установка, которая подключена к воздуходувке.

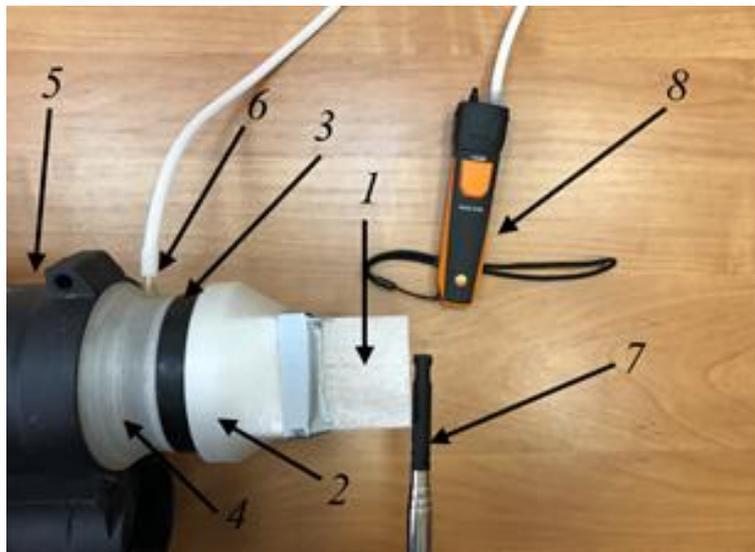


Рисунок 3.11 – Экспериментальная установка:

1 – двутавровые элементы в прямоугольном корпусе (сепаратор);

2 – переходник от сепаратора к фильтру; 3 – фильтр;

4 – переходник от фильтра к воздуходувке; 5 – воздуходувка;

6 – патрубок для подключения дифманометра; 7 – анемометр; 8 – дифманометр

При проведении эксперимента можно выделить несколько основных шагов:

- 1) Взвешивание двутавровых элементов в прямоугольном корпусе и фильтра респиратора на точных весах Superior mini digital platform scale. Данная операция производилась для сравнения массы элементов до и после эксперимента.
- 2) Подключение экспериментальной установки с воздуходувкой; подготовка линии подачи материала с измельченным мелом; подготовка дифманометра и анемометра.
- 3) Проведение эксперимента. Воздуходувка работает на всасывающем режиме. Со стороны расположения прямоугольного корпуса при помощи линии подачи материала подается измельченный мел. В ходе этого через мобильное устройство подключенного к дифманометру и анемометру записываются перепады давления и скорости потока газа.
- 4) Окончание эксперимента. Разборка установки. Визуальная оценка двутавровых элементов в прямоугольном корпусе и фильтра респиратора (рис. 3.12 и рис. 3.13). Взвешивание двутавровых элементов и фильтра респиратора для сравнения с первоначальными результатами.
- 5) Анализ результатов.



Рисунок 3.12 – Двутавровые элементы в прямоугольном корпусе после эксперимента



Рисунок 3.13 – Фильтр респиратора после проведения эксперимента



Рисунок 3.14 – Измерения входной скорости

В ходе эксперимента было установлено, что скорость на входе в экспериментальную установку в среднем 1,6 м/с (рис. 3.14).

Потери давления в установке в ходе эксперимента составили в среднем 1930 Па (рис. 3.15). Стоит отметить, что без двутавровых элементов в прямоугольном корпусе значения потери давления уменьшались в среднем на 40 Па.

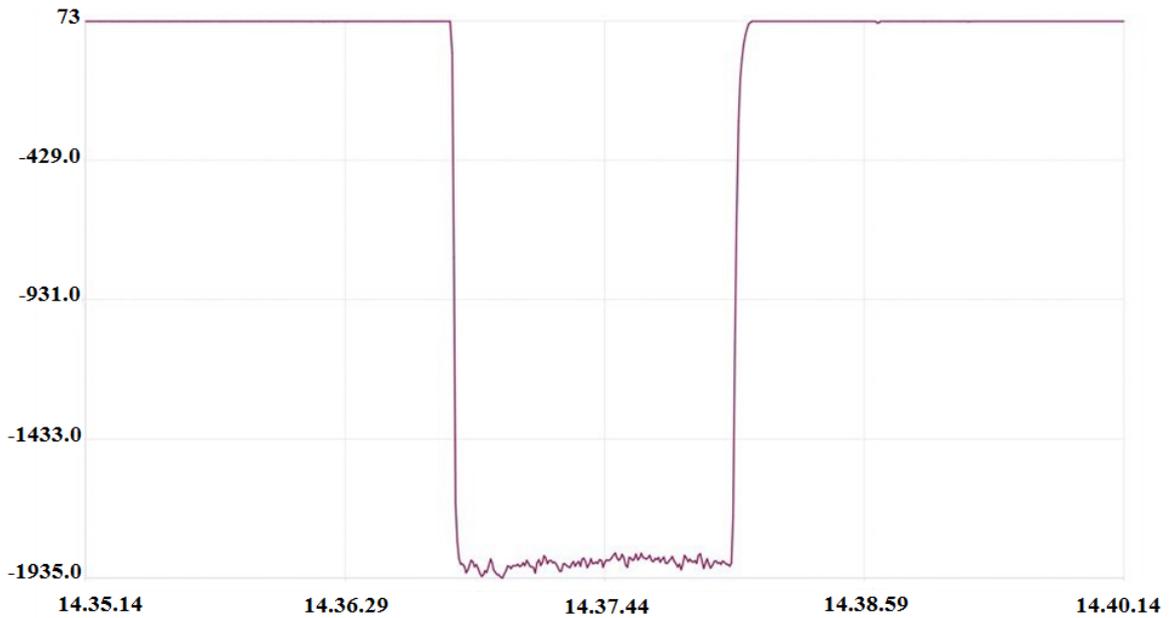


Рисунок 3.15 – Измерения потери давления

Проведенный эксперимент показал, что эффективность уловленных частиц пыли двутавровыми элементами в прямоугольном корпусе составляет 79,5 %. Эффективность определялась по оценке массы двутавровых элементов в прямоугольном корпусе и фильтре респиратора до и после эксперимента.

После проведенного эксперимента было произведено численное моделирование для определения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц пыли двутавровыми элементами в прямоугольном корпусе. Полученные данные сравнивались с физическим экспериментом.

На рисунке 3.16 представлена зависимость изменения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц пыли двутавровыми элементами в прямоугольном корпусе от скорости газового потока частиц при разном диаметре частиц.

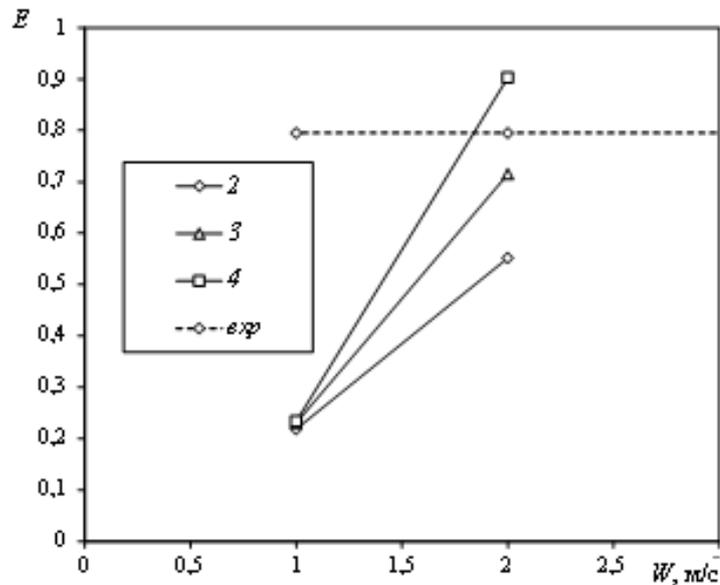


Рисунок 3.16 – Зависимость изменения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц пыли двутавровыми элементами от скорости газового потока при разном диаметре частиц

Результаты показали, что отклонения улавливания мелкодисперсных частиц пыли размером 2 мкм между физическим и численным экспериментом составляют около 20 %. Стоит отметить, что при проведении физического эксперимента размер частиц составлял преимущественно 2 мкм, однако за счет коагуляции их размер мог составлять более 2 мкм. Численный эксперимент проводился при скоростях 1 и 2 м/с для частиц размером 2; 3 и 4 мкм. Наиболее близкие значения численного моделирования к физическому эксперименту наблюдаются при скорости 2 м/с. Это можно объяснить тем, что при проведении физического эксперимента скорости на входе в прямоугольной корпус действительно варьировались в поле скоростей 2 м/с (рис. 3.16). Численный эксперимент показал, что при скорости 1 м/с все частицы улавливаются двутавровыми элементами практически с равной эффективностью 20 %. При увеличении скорости газового потока до 2 м/с эффективность двутавровых элементов в среднем равна 72,3 %, что на 7,2 % меньше, чем при физическом эксперименте.

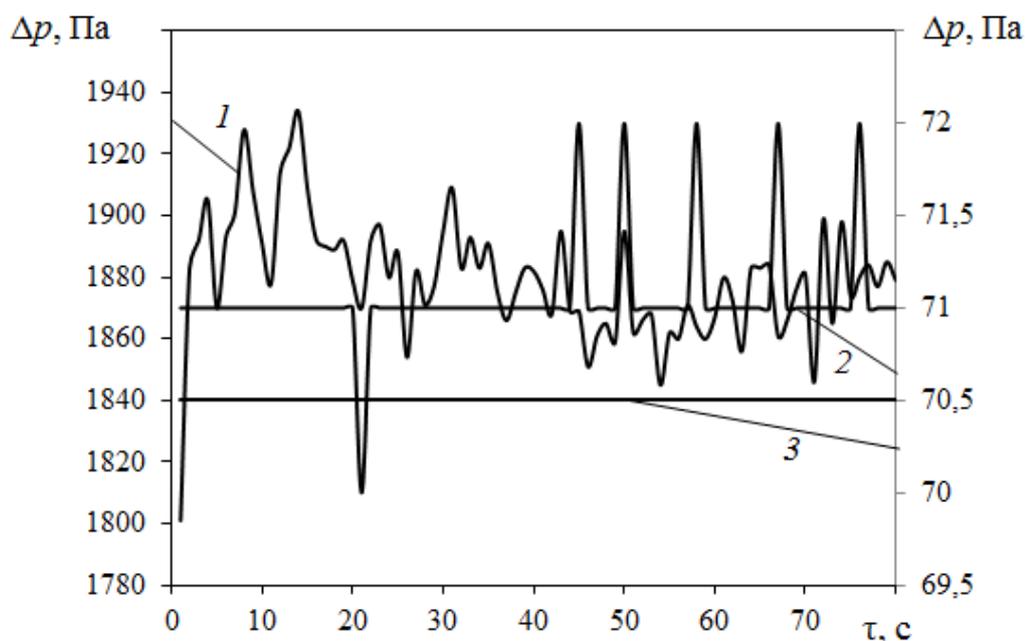


Рисунок 3.17 – Зависимость изменения потери давления в сепараторе от времени проведения эксперимента: 1 – экспериментальная установка с фильтром; 2 – экспериментальная установка без фильтра; 3 - компьютерное моделирование

Потери давления в установке с фильтром в ходе эксперимента составили в среднем 1930 Па. Такое большое сопротивление обусловлено использованием фильтра. Также было произведено измерение потери давления в установке без фильтра, в среднем оно равно 71 Па. Потери давления при проведении компьютерного моделирования составили в среднем 70,5 Па. Таким образом, погрешность по определению потери давления в сепараторе физическим и численными методами составила около 1 % (рис. 3.17). Необходимо отметить, что в ходе компьютерного моделирования потери давления измерялись на входном и выходном патрубках сепаратора, при этом на выходном патрубке устройства задавалось атмосферное давление 10^5 Па. Для идентичности измерения потери давления в ходе реального эксперимента одна линия дифманометра вводилась в входной патрубок, а другая удалялась от экспериментальной установки. При проведении физического эксперимента с фильтром первая линия дифманометра соединялась с патрубком б.

Глава 4. Оценка промышленного внедрения разработанного устройства

4.1 Улавливание мелкодисперсных частиц в энергосистеме в компании «КАМАТЕК»

Для проверки работоспособности разработанного сепаратора, модель, представленная на рисунке 4.1, была распечатана на 3D принтере и использована в очистительном цикле. В связи с тем, что распечатать опытный образец больших размеров и установить на ТЭС для проведения экспериментов представляется сложно реализуемым мероприятием, была распечатана сравнительно небольшая конструкция длиной и высотой 100 на 100 мм, которая была установлена на 4 месяца на предприятии «КАМАТЕК» в городе Набережные Челны, занимающимся производством технологических деталей из композиционных материалов. Тепловая энергия на «КАМАТЕК» вырабатывается при сжигании дизельного топлива. Стоит отметить, что по физическим параметрам частицы, которые необходимо улавливать на данной предприятии, схожи с частицами, находящимися в дымовых газах на ТЭС.

Для печати модели на 3D принтере использовался пластик ABS, достоинствами которого являются повышенная ударопрочность и влагостойкость. В сепараторе имеется 4 ряда двутавровых элементов. В каждом ряду по 5 элементов. Длина и толщина каждого двутаврового элемента 14 и 1 мм соответственно. Для уменьшения гидравлического сопротивления разработанного устройства ширина стенок корпуса сепаратора по бокам сужается по мере удаления от дна конструкции. Сепаратор крепился 4 болтами в входном проеме вытяжки на предприятии «КАМАТЕК». Для крепления сепаратора были проделаны 4 отверстия в дне устройства, по 2 отверстия с входной и выходной сторон сепаратора. Двутавровые элементы имеют немного пористую структуру, вследствие чего повышается эффективность очистки газового потока. Стоит отметить, что в данной распечатанной модели отсутствуют отверстия для удаления частиц пыли, упавших на дно аппарата, так как сепаратор закреплен в

верхней части проема вытяжки и занимает только некоторую часть данного проема, то закрепление пылевых мешков или специальных контейнеров будет достаточно сложным мероприятием (рис. 4.1).

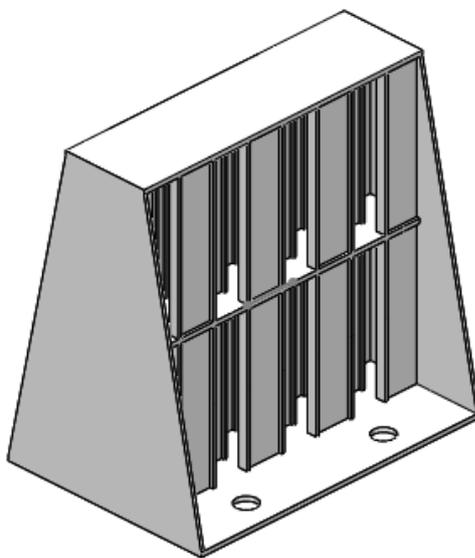


Рисунок 4.1 – 3D модель прямоугольного сепаратора

На предприятии реализовывалась следующая схема: газовый поток из цехового помещения через приточную систему поступал в предварительный фильтр, после чего направлялся в потолочный фильтр и в покрасочную камеру, далее газовый поток проходил через напольный фильтр волокнистого типа и двигался через входной проем вытяжки, в которой был установлен сепаратор. Стоит отметить, что размер входного проема вытяжки составляет 1200 на 400 мм, поэтому через сепаратор проходила только часть газового потока (рис. 4.2). После частичной очистки газового потока в сепараторе, газовый поток направлялся в фильтр тонкой очистки, после чего уходил в окружающую среду.

После 4 месяцев работы сепаратора на предприятии «КАМАТЕК» его масса увеличилась на 400 г. Визуальный осмотр позволил установить, что использование данного устройства перед фильтром тонкой очистки является актуальным мероприятием. В ходе использования сепаратора произошла поломка одного двутаврового элемента, вследствие малой толщины стенки. Анализ

уловленных частиц позволил установить, что размер пойманных частиц пыли варьируется в диапазоне 1 – 10 мкм. Визуальный осмотр каждого ряда позволил установить, что менее эффективным является первый ряд.



Рисунок 4.2 – Опытная модель прямоугольного сепаратора на промышленном предприятии



Рисунок 4.3 – Прямоугольный сепаратор после 4 месяцев работы

Данное свидетельство подтверждает, что основной силой, которая влияет на очистки газового потока от частиц пыли, является центробежная, вследствие того, что она возникает между двутавровыми элементами соседних рядов, поэтому на

первом ряду двутавровых элементов центробежная сила не формируется, как следствие, первый ряд двутавровых элементов практически чистый относительно других рядов (рис. 4.3).

Таким образом, можно отметить, что вследствие данной модернизации очистительного цикла, путем установки в него разработанного сепаратора, существенно повысится эффективность очистки газового потока и увеличится остаточный ресурс фильтра тонкой очистки. Минусом данного внедрения является повышение потери давления в очистительном цикле, что может потребовать увеличения мощностей компрессора для продувки газового потока.

Проведенные исследования позволили подтвердить высокую эффективность очистки газового потока от частиц пыли до 1 мкм прямоугольным сепаратором на практике. Также было подтверждено, что основной силой, влияющей на очистку газа от пыли, является центробежная и достижение ее максимального значения является приоритетной задачей при создании сепаратора. В свою очередь максимальное значение центробежной силы, между элементами соседних рядов двутавровых элементов, возможно достичь при правильной компоновке элементов внутри сепаратора: соблюдением необходимой длины между двутавровыми элементами и рядами.

4.2 Конструктивные особенности прямоугольного сепаратора

Одним из главных преимуществ прямоугольного сепаратора является легкость в сборке и разборке (рис. 4.4), что позволяет сократить время на очистку устройства и его полное восстановление. Основой устройства служит блок двутавровых элементов, который образуется сборкой блочных 1 и поперечных блочных пластин 2. Блок двутавровых элементов заключается в прямоугольный корпус, состоящий из крышки 3 и корпуса 4. Для исключения колебаний блока двутавровых элементов и обеспечения жесткости конструкции она фиксируется шпильками 5, проходящими через блок двутавровых элементов, тем самым,

исключая вероятность смещения пластин. На концах шпилек устанавливаются гайки 6.

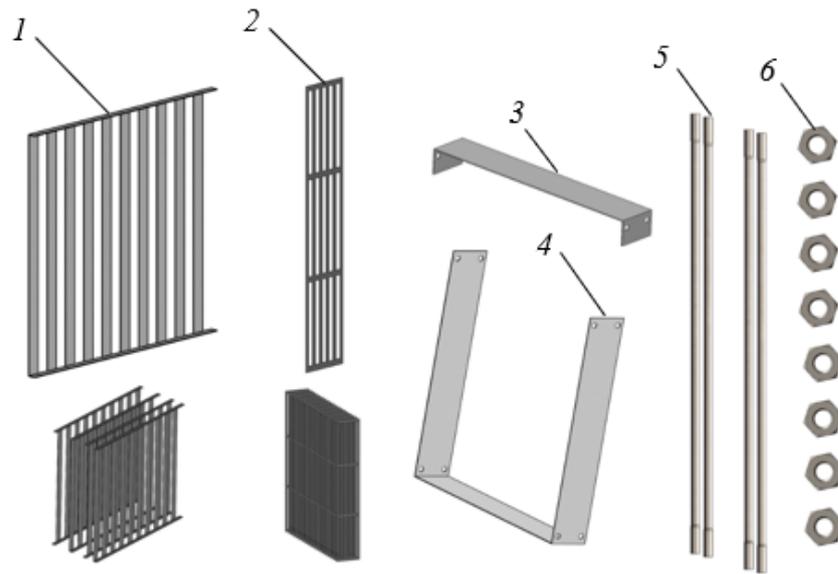


Рис. 4.4 – Конструктивные элементы прямоугольного сепаратора:
 1 – блочные пластины; 2 – поперечные блочные пластины; 3 – крышка корпуса; 4 – корпус; 5 – шпильки; 6 – гайки

Изделие в сборе выглядит следующим образом:



Рисунок 4.5 – Модель прямоугольного сепаратора металла

4.3 Оценка экономической эффективности внедрения прямоугольных сепараторов на ТЭС 1 г. Уонг Би

Производственные затраты и производительность труда на промышленных предприятиях определяются технико-экономическими показателями используемого оборудования. Важной задачей является проведение экономического расчета прямоугольных сепараторов по их интеграции в технологическую линию предприятия.

Прогнозируется, что применение прямоугольных сепараторов в качестве предварительной ступени очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц перед фильтрами позволит увеличить их срок службы в 2 раза.

Таблица 4.1 – Технические характеристики ТЭЦ – 1 в г. Уонг Би

№	Показатели	Значения	Размерность
1	Расход дымовых газов от одной печи	198956	м ³ /час
2	Концентрация пыли в дымовых газах	80	г/нм ²
3	Рабочая температура дымовых газов	130	°С
4	Максимальная рабочая температура дымовых газов	250	°С

Смета затрат на внедрения устройства:

Рассмотрим основные затраты, влияющие на расчет оценки экономической эффективности внедрения прямоугольных сепараторов на предприятии. Для этого сперва необходимо рассчитать инвестиционный бюджет, который требуется на финансирование проекта предприятием. В данном случае инвестиционный бюджет состоит из следующих инвестиционных издержек: материальные затраты на приобретение прямоугольных сепараторов, накладные расходы, заработная

плата и прочие. Таким образом, совокупность затрат на реализацию проекта будет определяться по следующей формуле:

$$K = K_{\text{мат}} + K_{\text{н}} + K_{\text{пр}} \quad (4.1)$$

где $K_{\text{мат}}$ – материальные затраты, руб.; $K_{\text{н}}$ – накладные расходы, руб.; $K_{\text{пр}}$ – прочие расходы, руб.;

Материальные затраты:

Материальные затраты предполагают затраты, которые необходимы на приобретение сырья и основных материалов для нового аппарата. В сумме затраты для приобретения четырех прямоугольных сепараторов составляют 8 000 руб.

$$K_{\text{мат}} = 8\,000 \text{ руб.}$$

Расчет амортизационных отчислений устройства:

Формирование амортизационного фонда в виде материальных средств, которые предназначены для ремонта и замены изношенных и поврежденных сепараторов. Расчет амортизационных отчислений осуществлялся линейным методом. Следует отметить, что данный подход является наиболее распространенным в налоговом и бухгалтерском учете РФ. Суть подхода заключается в следующем: через равные промежутки времени (например, ежегодно или ежемесячно) амортизируется равная доля стоимости сепараторов на протяжении всего срока их эксплуатации. В данном расчете примем, что амортизационные отчисления будут происходить ежегодно. Тогда, формула, позволяющая определить ежегодную сумму амортизации $A_{\text{год}}$, будет вычисляться следующим образом:

$$A_{\text{год}} = \frac{C_{\text{п}} H_{\text{а}}}{100\%} \quad (4.2)$$

где $C_{\text{п}}$ – первоначальная стоимость устройства, руб.; $H_{\text{а}}$ – норма амортизации, %.

С помощью нормы амортизации регулируется темп возмещения

произведенных капитальных затрат. Норма амортизации H_A представляет собой отношение 100 % на срок полезного использования (N).

$$H_A = \frac{100 \%}{N} \quad (4.3)$$

Тогда:

$$H_A = \frac{100 \%}{2} = 50 \%$$

Ежегодная сумма амортизации составит:

$$A_{\text{год}} = 8\,000 \times \frac{50 \%}{100 \%} = 4\,000 \text{ руб.}$$

Накладные расходы:

Расчет накладных расходов осуществляется путем выявления дополнительных затрат предприятия и их суммирования. К накладным расходам при внедрении и использовании сепараторов в технологической линии предприятия относятся затраты на прибавку к заработной плате работников, осуществляющих монтажные работы и обслуживающих данные фильтры, и для оборудования рабочих мест. Накладные расходы принимаются в размере $K_n = 5\,000$ руб.

Прочие расходы:

Прочие расходы, как правило, составляют около 10 % от материальных затрат проекта. К ним относят расходы, которые не вошли в ранее составленную смету. Зачастую большая часть прочих расходов относится к незапланированным затратам.

$$K_{\text{пр}} = \frac{10\%}{100\%} \times 8\,000 = 800 \text{ руб.}$$

Затраты в месяц на заработную плату обслуживающего персонала:

Средняя заработная плата рабочему составляет $K_{\text{зн}} = 15\,000$ руб.

Таким образом сумма затрат на проект по формуле составляет:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{мат}} + K_{\text{накл}} + K_{\text{пр}} = 8\,000 + 5\,000 + 800 = 13\,800 \text{ руб.}$$

Таким образом, итоговая сумма затрат на реализацию данного проекта по формуле (4.1) будет составлять $K = 13\,800$ руб.

Стоимость одного прямоугольного сепаратора оценивается в 2000 руб. Прогнозируется, что применение сепараторов в качестве предварительной ступени очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц перед фильтрами позволит увеличить их срок службы на 25 %. Следует отметить, что при оценке затрат предприятия на замену прямоугольных сепараторов, время простоя предприятия при их замене и, соответственно, финансовые потери оценить достаточно сложно и является сугубо субъективной оценкой, поэтому данный показатель учитываться в расчетах не будет.

Таблица 4.2 – Смета затрат на внедрение новых устройств

№	Элементы затрат	Прямоугольные сепараторы	Единицы измерения
1	Материальные затраты	8 000	руб.
2	Накладные расходы	5 000	руб.
3	Прочие расходы	800	руб.
Итого		13 800	руб.

Приведенные результаты расчета в таблице 4.3 показывают, что применение прямоугольных сепараторов в качестве предварительной ступени очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц перед фильтрами является экономически выгодным мероприятием. Разность между итоговыми показателями затрат предприятия на приобретение и замену фильтров без использования прямоугольных сепараторов и с ними составила 160 000 руб. В данном случае, вычисленная разность будет соответствовать финансовым потокам за 10 лет, т.е. будет отображать какое количество финансовых средств предприятие получило

путем экономии при использовании более выгодной технологической линии очистки газов, относительно предшествующей ей.

Таблица 4.3 – Затраты предприятия на приобретение и замену фильтров без использования прямоугольных сепараторов и с ними.

Оборудование	Обязательная замена фильтров	Кол-во используемых прямоугольных сепараторов, шт.	Расход на приобретение и замену прямоугольных сепараторов, руб.	Общие затраты на приобретение и замену прямоугольных сепараторов за 10 лет, руб.
Фильтры	1 раз в 18 мес.	4 (28)	56 000	560 000
Фильтры с использованием прямоугольных сепараторов в качестве предварительной ступени очистки	1 раз в 24 мес.	4 (20)	40 000	400 000

Срок окупаемости капитальных вложений:

$$T = K/D,$$

где T — срок окупаемости в годах; K — капитальные вложения, руб.; D — годовая чистая прибыль (в нашем случае полученная экономия расхода на приобретение и замену прямоугольных сепараторов), руб.

$$T = K/D = 13\,800/16\,000 = 0,8625 \text{ лет}$$

Полученные данные показывают, что внедрение разработанных прямоугольных сепараторов на предприятии для улавливания частиц пыли является экономически выгодным мероприятием. Общий экономический эффект за 10 лет от использования прямоугольных сепараторов в качестве предварительной ступени очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц

перед фильтрами составляет 160000 руб. при сроке окупаемости 10 месяцев. Можно сделать вывод, что внедрение предлагаемых сепараторов позволит предприятию снизить постоянные финансовые затраты на закупку и замену фильтров на 29 % за 10 лет. Следует отметить, что представленные расчеты являются ориентировочными, так как позволяют подвести итоги об экономической эффективности планируемого мероприятия по интеграции прямоугольных сепараторов в технологическую линию предприятия.

Основные результаты и выводы

1. На основе анализа обзора существующих аппаратов для очистки и улавливания мелкодисперсных частиц из дымовых газов ТЭС разработано полностью разборное устройство, состоящее из простых элементов, улавливающее твердые частицы и капли диаметром 5 мкм с эффективностью более 99% при меньшем, чем у традиционных аналогичных аппаратов гидравлическом сопротивлении при сопоставимой производительности.
2. Получены уравнения для определения геометрических размеров элементов сепаратора, позволяющие подобрать конструкцию для достижения требуемой степени очистки от частиц из дымовых газов ТЭС.
3. Разработано математическое описание процесса очистки газового потока от мелкодисперсных частиц при различном количестве рядов элементов сепаратора и элементов в каждом ряду.
4. Экспериментально исследован сепаратор с двутавровыми элементами на промышленном предприятии ООО «КАМАТЕК» в г. Набережные Челны. Доказана возможность продления срока службы фильтров для тонкой очистки технических газов более чем в два раза.
5. Получены зависимости коэффициента гидравлического сопротивления прямоугольного сепаратора от среднерасходной скорости потока газа. Определены два характерных режима работы сепаратора, при которых коэффициент гидравлического сопротивления существенно изменяется.
6. Определена конструкция сепарационных элементов, при которой устройство работает с наибольшей эффективностью очистки газовых выбросов. Использование двутавровых сепарационных элементов позволяет получить значение эффективности улавливания частиц из дымовых газов ТЭС на 5% больше чем при использовании дугообразных элементов.
7. Установлено, что при среднерасходной скорости прохождения дымовых газов через предлагаемый сепаратор равной 10 м/с эффективность достигает наибольшего значения.

**Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования
диссертационной работы**

1. Исследовать эрозионный износ сепарационных перегородок в зависимости от параметров улавливаемых частиц и конструктивных особенностей устройства.

2. Исследовать дробление капель жидкости внутри сепарационного устройства с прямоугольными сепарационными перегородками.

Библиографический список

1. Park , S.J. Performance Improvement of Micron-Sized Fibrous Metal Filters by Direct Growth of Carbon Nanotubes / S.J. Park, D.G. Lee // CARBON. – 2006. – №. 44. – P. 1930–1935.
2. Страус, В. Промышленная очистка газов / В. Страус - М.:Химия, 1981. - 616 с.
3. Старк С. Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии/ С. Б. Старк //М.: Металлургия. – 1977. – 328 с.
4. Володин, А. Н. Пылеуловители инерционно-центробежного типа / А. Н. Володин // ЭЖиП: Экология и промышленность России. – 2002. – №. 7. – С. 13-14.
5. Алиев, Г.М.-А.. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов / Г.М.-А. Алиев// Металлургия, Москва, 1986. – 543 с.
6. Медников Е. П. Вихревые пылеуловители / Е. П. Медников// М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1975. – 45 с.
7. Питак, И. В. Исследование процесса мокрого улавливания пыли в роторном вихревом аппарате / И. В. Питак // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Новые решения в современных технологиях. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2010. – № 17. – С. 135-141.
8. Овсянников, Ю. Г. Циклонные пылеуловители аспирационных систем / Ю. Г. Овсянников, А. М. Агарков // Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений. – 2013. – С. 161-165.
9. Лазарев, В. А. Циклоны и вихревые пылеуловители / В. А. Лазарев // Нижний Новгород: Фирма ОЗОН-НН.–2006.–320 с. – 2006.
10. Сугак, А. Центробежные пылеуловители и классификаторы / А. Сугак, Е. Сугак // ИД «LAP Lambert Academic Publishing. – 2012.
11. Асламова В. С. Прямоточные циклоны/ В. С. Асламова // Теория, расчет, практика. – 2008.
12. Ватин, Н. И. Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон / Н. И.

Ватин, К. И. Стрелец // Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Инженерно-строительный факультет. – 2003.

13. Асламова, В. С. Процесс сепарации в высокопроизводительных прямооточных циклонах и методы их расчета: дис. – 2009.

14. Чистяков, Я. В. Основы сепарации мелкодисперсной пыли в центробежно-инерционном пылеуловителе / Я. В. Чистяков, К. М. Муратова, Н. И. Володин // Экология и промышленность России. – 2016. – №. 8. – С. 20-27.

15. Василевский, М. В. Расчетная модель концентрирования частиц в противоточном цилиндрическом циклонном аппарате / М. В. Василевский, Е. Г. Зыков, А. С. Разва // Теоретические основы химической технологии. – 2011. – Т. 45. – №. 3. – С. 321-328.

16. Ватин, Н. И. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве / Н. И. Ватин // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – №. 4. – С. 16-21.

17. Инюшкин, Н. В. Исследование процесса улавливания летучей золы в экспериментальной модели электроциклона / Н. В. Инюшкин // Инженерный вестник Дона. – 2011. – №. 4.

18. Лаптев, А. Г. Очистка газов от аэрозольных частиц сепараторами с насадками / А. Г. Лаптев, М. И. Фарахов, Р. Ф. Миндубаев // Казань : Печатный Двор, 2003.

19. Дмитриев, А. В. Улавливание частиц из дымовых газов прямоугольными сепараторами / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, Н. В. Линь // Вестник Казанского технологического университета. – 2017. – Т. 20. – №. 15.

20. Муратова, К. М. Пылеулавливание и классификация в центробежно-инерционных аппаратах / К. М. Муратова, Я. В. Чистяков, А. А. Махнин // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2014. – №. 4.

21. Боровков, Д. П. Исследование по оптимизации характеристик верхнего ввода пылеуловителей со встречными закрученными потоками / Д. П. Боровков // Фундаментальные исследования. – 2013. – Т. 5. – №. 11.

22. Азаров, В. Н. Системы пылеулавливания с инерционными аппаратами в производстве строительных материалов / В. Н. Азаров, Н. М. Сергина //

Строительные материалы. – 2003. – №. 8. – С. 14-15.

23. Разва А. С. Оценки гидродинамических параметров циклонных потоков и разработка новых технических решений инерционных пылеуловителей : дис. – 2009.

24. Смирнов, Д. Е. Экспериментальные исследования пылеуловителя-классификатора / Д. Е. Смирнов, А. В. Сугак, Н. И. Володин //Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2009. – Т. 52. – №. 12. – С. 105-107.

25. Кирш, В. А. Инерционное осаждение аэрозольных частиц из ламинарного потока в волокнистых фильтрах / В. А. Кирш, Д. А. Припачкин, А. К. Будыка //Коллоидный журнал. – 2010. – Т. 72. – №. 2. – С. 206-210.

26. Гурин, А. А. Инновационные технологии пылеулавливания на горно-обогатительных предприятиях/ А. А. Гурин, В. И. Мулякко, В. И. Ляшенко //Безопасность труда в промышленности. – 2013. – №. 9. – С. 54-59.

27. Батлук В. А. Исследование процесса пылеулавливания с помощью жалюзийного инерционного пылеуловителя нового типа : дис. –Львов, 1973.–143 с, 1973.

28. Исмагилов А. Т. Методы интенсификации эффективности улавливания аэрозолей в аппаратах ударно-инерционного действия / А. Т. Исмагилов //Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2010. – №. 1.

29. Дмитриев, А. В. Улавливание мелкодисперсных твердых частиц из газовых потоков в прямоугольных сепараторах / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, Н. В. Линь // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – №. 3 (134).

30. Усачев, А. П. Математическая модель оптимизации геометрических параметров газовых фильтров, располагаемых в обогреваемых помещениях А. П. / Усачев, С. В. Густов //Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2014. – №. 4. – С. 279-301.

31. Уайт П. Высокоэффективная очистка воздуха / П. Уайт // – Рипол Классик, 2014.

32. Бернер Г. Я. Технология очистки газа за рубежом / Г. Я. Бернер // Directmedia, 2013.
33. Усачев, А. П. Обоснование и разработка многоблочной установки очистки природного газа от твердых частиц / А. П. Усачев, А. Л. Шурайц, А. В. Бирюков //Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2012. – №. 4. – С. 437-448.
34. Дерябин ,В. А. Очистка запыленного воздуха и рассеивание примесей промышленных выбросов/ В. А. Дерябин, С. Г. Власова, Фарафонтова Е. П. Фарафонтова //учеб. электронное текстовое изд./ВА Дерябин, СГ Власова, ЕП Фарафонтова.–М.: УГТУ-УПИ. – 2006.
35. Кулакова, И. М. Автоматизированная система технологического расчета пылеосадительных камер / И. М. Кулакова, А. Ю. Кулаков, В. С. Асламова //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2010. – Т. 317. – №. 5.
36. Кириченко, А. М. Физические процессы пылеосаждения в вертикальной камере с волоконными коагуляторами / А. М. Кириченко, В. И. Мулявко, С. Н. Панова //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2002. – №. 8.
37. Мензелинцева, Н. В. Аппараты на базе зернистых фильтров для очистки промышленных выбросов от твердых частиц / Н. В. Мензелинцева, Н. Ю. Карапузова, С. Б. Дьякова //Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2011. – №. 25. – С. 252-255.
38. Короткий Н. Н. Инерционный пылеуловитель СТФ-Ц / Н. Н. Короткий //Наука и Техника. – 2018. – №. 1. – С. 21-23.
39. Кисляк С. М. Разработка уловителей и систем возврата уноса в котлах с низкотемпературным кипящим слоем : дис. – Барнаул : [Алт. гос. техн. ун-т им. ИИ Ползунова], 2004.
40. Кривенцов, С. М. Струйно-инерционный пылеуловитель для очистки промышленных выбросов предприятий/ С. М. Кривенцов, В. К. Шумилин // Символ науки. – 2018. – С. 13.

41. Пивоварова, С. И. Регенерация фильтров импульсными струями в вентиляционных системах очистки воздуха от пыли/ Пивоварова С. И.// Автореферат диссертации. – 1997.
42. Возмилов А. Г. Разработка полной методики расчета эффективности очистки воздуха от пыли, микроорганизмов и вредных газов с помощью двухступенчатого мокрого электрофильтра / А. Г. Возмилов //Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – №. 4.
43. Николаев, М. Ю. Электрофильтры: принцип работы и основные достоинства/ Николаев М. Ю. Николаев, Есимов А. М. Есимов, Леонов В. В. Леонов //Технические науки-от теории к практике. – 2014. – №. 41. – С. 59-65.
44. Санаев, Ю. И. Обеспыливание газов электрофильтрами / Ю. И. Санаев //Семибратово.: Кондор–Эко. – 2009.
45. Носырев, Д. Я. Моделирование процесса очистки газовых выбросов тепловозных дизелей от сажи в циклоне-электрофильтре / Д. Я. Носырев, А. А. Свечников //Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – №. 4. – С. 31-36.
46. Чепелев, Н. И. Результаты экспериментальных исследований эффективности работы электрофильтра на зерноперерабатывающих предприятиях/ Н. И. Чепелев //Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2010. – №. 10.
47. Титов , А. Г. Улавливание высокодисперсных туманов в электрофильтре/ А. Г. Титов, З. Р. Гильванова //Инженерный вестник Дона. – 2012. – Т. 23. – №. 4-2.
48. Возмилов, А. Г. Об основных задачах, решаемых при проектировании мокрых электрофильтров / А. Г. Возмилов //Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10. – №. 1.
49. Верещагин, И. П. Совершенствование метода расчета процессов в электрофильтрах для очистки дымовых газов ТЭС от золы / И. П. Верещагин, К. А. Смагин, Е. М. Тимофеев // Электричество. – 2015. – №. 6. – С. 12-19.
50. Касимова, Б. Р. Разработка математической модели электрофильтра с

вращающимся осадительным электродом / Б. Р. Касимова, А. А. Баубек, А. К. Кусатаева //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2013. – Т. 322. – №. 2.

51. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин // М.: ООО ТИД "Альянс", 2004. - 753 с.

52. Карташевич, А.Н. Методика расчета сажевого электрофильтра-дожигателя/ А.Н. Карташевич, В.А. Белоусов // Агропанорама. - 2008. - N 2. - С. 32-35.

53. Лысаков А. А. Воздушный электрофильтр/ А. А. Лысаков //Сельский механизатор. – 2014. – №. 2. – С. 34-35.

54. Лысаков А. А. Питание электрофильтра для очистки воздуха / А. А. Лысаков //Сельский механизатор. – 2010. – №. 4. – С. 21-21.

55. Скопов, Г. В. Вывод из оборота и отдельная переработка пыли электрофильтров плавки Ванюкова ОАО «Среднеуральский медеплавильный завод» / Г. В. Скопов, В. В. Беляев, А. В. Матвеев //Цветные металлы. – 2013. – №. 8. – С. 55-59.

56. Большаков, В. П. Поршневой пневмотранспорт золы электрофильтров ТЭС / В. П. Большаков, Б. М. Кунтулов, В. В. Ермаков //Теплоэнергетика. – 2004. – №. 12. – С. 41-44.

57. Бердышев, В. Ф. Системная оценка факторов, влияющих на эффективность работы электрофильтра отходящих газов / В. Ф. Бердышев, К. С. Шатохин, Е. А. Мошкина //Металлург. – 2011. – №. 2. – С. 26-30.

58. Чайкин, Л. И. Влияние пыли электрофильтров на процесс сгущения красных шламов в цикле Байера / Л. И. Чайкин, А. А. Шопперт //Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – №. 4. – С. 145-147.

59. Логинова, И. В. Влияние добавки пыли электрофильтров печей спекания на совместное выщелачивание бокситов и спеков / И. В. Логинова, А. А. Шопперт, Л. И. Чайкин // Металлург. – 2015. – №. 8. – С. 64-68.

60. Чекалов, Л. В. Основы разработки и конструирования электрофильтров нового поколения/ Л. В. Чекалов //ЛВ Чекалов. – 2006. – С. 67-69.

61. Чекалов, Л. В. Новые разработки рукавных фильтров / Л. В. Чекалов, Ю. И. Громов, В. В. Чекалов //Цемент и его применение. – 2006. – №. 4. – С. 10-14.
62. Горячев, И. К. О разработке рукавных фильтров для теплоэнергетики / И. К. Горячев //Теплоэнергетика. – 2002. – №. 2. – С. 74-75.
63. Глебов, И. Т. Сопротивление тканевого фильтра аспирационной системы / И. Т. Глебов //Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. – 2009. – С. 350-358.
64. Моргулис, М. Л. Рукавные фильтры/ М. Л. Моргулис, М. Г. Мазус, А. С. Мандрико, М. И. Биргер //М.: Машиностроение, 1977. 256 с. – 1977.
65. Бахтизин, Р. Н. Экспериментальные исследования пропускной способности фильтра тонкой очистки / Р. Н. Бахтизин, К. Р. Уразаков, С. В. Смольников, М. Е. Политов //Нефтяное хозяйство. – 2014. – №. 9. – С. 122-124.
66. Бышов, Н. В. Инновационные технологии оценки ресурса фильтров тонкой очистки топлива системы Common Rail / Н. В. Бышов //Техника и оборудование для села. – 2014. – №. 2. – С. 9-12.
67. Мельников, В. П. Аэрозольные и сорбционные фильтры нового поколения для вентсистем действующих АЭС / В. П. Мельников, И. В. Ягодкин, П. Н. Мартынов, А. М. Посажеников, А. К. Паповянец, С. С. Скворцов //Шестая Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», М. – 2008.
68. Фастовский, В. Г. Инертные газы / В. Г. Фастовский, А. Е. Ровинский, Ю. В. Петровский // М.: Атомиздат, 1972. - 352 с.
69. Гейнеман, А. А. Очистка газовых и жидких сред металлокерамическими СВС-фильтрами / А. А. Гейнеман, В. Д. Гончаров, А. Л. Новосёлов, Н. Ю. Щетинкина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – Т. 311. – №. 2.
70. Виноградов, В. В. Влияние структуры щелевого фильтра на гидравлическое сопротивление / В. В. Виноградов, Ю. А. Зыкова, Н. М. Самохвалов //Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2015. – №. 4. – С. 3-10.

71. Дмитриев, К. И. Исследование фильтрации аэрозоля в слое пористых углеродных гранул / К. И. Дмитриев //Каучук и резина. – 2009. – №. 4. – С. 22-26.
72. Новикова, Л. Я. Методика исследований пылеуловителя для дробилок зерна / Л. Я. Новикова, В. И. Ширококов, С. П. Игнатъев, В. А. Жигалов //Теория и практика–устойчивому развитию агропромышленного комплекса. – 2015. – С. 182.
73. Ермолаева, В. А. Система очистки воздуха от сварочного аэрозоля / В. А. Ермолаева //Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2014. – №. 2. – С. 5.
74. Глиняная, Н. М. Охрана окружающей среды от выбросов литейного производства: методические указания для студентов специальностей ЛП, ОЛП/сост. НМ Глиняная/ Н. М. Глиняная //Краматорск: ДГМА. – 2012.
75. Гелетуха, Г. Г. Обзор современных технологий сжигания древесины с целью выработки тепла и электроэнергии. Часть 2 / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железная //Экотехнологии и ресурсосбережение.-Ч. 1. – 1999. – №. 5. – С. 3.
76. Афонин, И. А. Повышение эффективности работы тканевых фильтров в холодный период года / И. А. Афонин //Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2013. – Т. 1. – №. 71. – С. 175-177.
77. Ровин, С. Л. Рекуперация тепла / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, А. В. Ткаченко //Литьё и металлургия. – 2011. – №. 2 (60).
78. Хандогина Н. А. Проект установки очистки газоздушных выбросов, завод «Оптиком», г. Томск. – 2016.
79. Пуринг, С. М. Обзор существующих аппаратов для очистки выбросов от высокодисперсных аэрозолей / С. М. Пуринг, Д. Н. Ватузов, Н. П. Тюрин //Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии. – 2017. – С. 376-379.
80. Энговатова, В. В. Анализ способов очистки дымовых газов от вредных примесей / В. В. Энговатова, Д. А. Оксюзьян, А. Н. Рязанова, А. В. Энговатов //Open innovation. – 2018. – С. 23-26.
81. Бутенко, А. Г. Комбинированная система очистки воздуха / А. Г. Бутенко, С. Ю. Смык //Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010.

82. Злочевский, В. Л. Анализ формирования аэропотока в циклоне / В. Л. Злочевский, К. А. Мухопад //Южно-Сибирский научный вестник. – 2015. – №. 4. – С. 5-13.

83. Кошкарев, С. А. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита / С. А. Кошкарев, В. Н. Азаров //Инженерно-строительный журнал. – 2015. – №. 2. – С. 18-32.

84. Азаров, В. Н. К экспериментальной оценке эффективности аппарата мокрой очистки в системах обеспыливания выбросов в атмосферу от печей обжига керамзита / В. Н. Азаров, С. А. Кошкарев, Л. Я. Соломахина //Инженерный вестник Дона. – 2014. – Т. 31. – №. 4-1.

85. Syred, C. Cyclone gasifier and cyclone combustor for the use of biomass derived gas in the operation of a small gas turbine in cogeneration plants / C. Syred, W. Fick //Fuel. – 2004. – Т. 83. – №. 17-18. – С. 2381-2392.

86. Reethof, G. Acoustic agglomeration of power plant fly ash for environmental and hot gas clean-up / G. Reethof //Journal of vibration, acoustics, stress, and reliability in design. – 1988. – Т. 110. – №. 4. – С. 552-557.

87. Patterson, P. A. Gas and particle flow patterns in cyclones at room and elevated temperatures / P. A. Patterson, R. J. Munz //The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 1996. – Т. 74. – №. 2. – С. 213-221.

88. Chmielniak, T. Method of calculation of new cyclone-type separator with swirling baffle and bottom take off of clean gas—part I: theoretical approach / T. Chmielniak, A. Bryczkowski //Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2000. – Т. 39. – №. 5. – С. 441-448.

89. Hoffman, A. C. Gas cyclones and swirl tubes / A. C. Hoffman // Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 2002. – Т. 56.

90. Trefz, M. Extended cyclone theory for gas flows with high solids concentrations / M. Trefz, E. Muschelkautz //Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry Plant Equipment Process Engineering Biotechnology. – 1993. – Т. 16. – №. 3. – С. 153-160.

91. Krames, J. The cyclone scrubber—a high efficiency wet separator / J. Krames,

H. Büttner //Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry Plant Equipment Process Engineering Biotechnology. – 1994. – T. 17. – №. 2. – C. 73-80.

92. Crane, R. I. Particulate behaviour in cyclone separators with secondary gas extraction / R. I. Crane, L. N. Barbaris, P. Behrouzi //Journal of Aerosol Science. – 1992. – T. 23. – C. 765-768.

93. Obermair, S. Investigation of the flow pattern in different dust outlet geometries of a gas cyclone by laser Doppler anemometry / S. Obermair, J. Woisetschläger, G. Staudinger //Powder Technology. – 2003. – T. 138. – №. 2-3. – C. 239-251.

94. Li, J. Theory and application of cyclone with impulse electrostatic excitation for cleaning molecular gas / J. Li, W. Cai //Journal of electrostatics. – 2006. – T. 64. – №. 3-4. – C. 254-258.

95. Hasler, P. H. Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification / P. H. Hasler, T. Nussbaumer //Biomass and bioenergy. – 1999. – T. 16. – №. 6. – C. 385-395.

96. Meier, H. F. Gas-solid flow in cyclones: The Eulerian-Eulerian approach / H. F. Meier, M. Mori //Computers & chemical engineering. – 1998. – T. 22. – C. S641-S644.

97. Bohnet, M. Cyclone Separators for Fine Particles and Difficult Operating Conditions / M. Bohnet // KONA Powder and Particle Journal. – 1994. – T. 12. – C. 69-76.

98. Muschelknautz, E. Cyclones and other gas—solids separators / E. Muschelknautz, V. Greif //Circulating Fluidized Beds. – Springer, Dordrecht, 1997. – C. 181-213.

99. Bernard, J. G. Cyclone performance at high temperatures and pressures / J. G. Bernard //Proc. 5th World Filtration Congress, Nice (France). – 1990. – T. 2. – C. 510-515.

100. Ciliberti, D. F. Performance of rotary flow cyclones / D. F. Ciliberti, B. W. Lancaster //AIChE Journal. – 1976. – T. 22. – №. 2. – C. 394-398.

101. Giuffrida, A. Efficiency enhancement in IGCC power plants with air-blown

gasification and hot gas clean-up / A. Giuffrida, M. C. Romano, G. Lozza //Energy. – 2013. – T. 53. – C. 221-229.

102. Tsochatzidis, N. A. Methods help remove black powder from gas pipelines / N. A. Tsochatzidis, K. E. Maroulis //Oil and gas journal. – 2007. – T. 105. – №. 10. – C. 52.

103. Gronald, G. Simulating turbulent swirling flow in a gas cyclone: A comparison of various modeling approaches / G. Gronald, J. J. Derksen //Powder technology. – 2011. – T. 205. – №. 1-3. – C. 160-171.

104. Mazyan W. I. Increasing efficiency of natural gas cyclones through addition of tangential chambers / W. I. Mazyan //Journal of aerosol science. – 2017. – T. 110. – C. 36-42.

105. Gupta, K. K. Bio-fuels for the gas turbine: A review / K. K. Gupta, A. Rehman, R. M. Sarviya //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – T. 14. – №. 9. – C. 2946-2955.

106. Bohnet, M. Influence of the gas temperature on the separation efficiency of aerocyclones / M. Bohnet //Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 1995. – T. 34. – №. 3. – C. 151-156.

107. Krishnamurthy, S. Apparatuses and methods for gas-solid separations using cyclones / S. Krishnamurthy, W. Koves // пат. 8419835 США. – 2013.

108. Qianwen, W. Promoting fine particle removal in double-tower cascade wet flue gas desulfurization system by flue gas temperature reduction W. / Qianwen, W. Leilei, W. Hao, Y. Hongmin // Powder Technology. 2020. P. 581-589.

109. Lin, C. Synergistic capture of fine particles in wet flue gas through cooling and condensation / C. Lin, S. Xiangda, Y. W. Yuzhong // Applied Energy. 2018. P. 656-667.

110. Kai, L. CFD simulation of fine particle removal in flue gas condensing heat exchanger / L. Kai, W. Enlu, W. Qi, H. Naveed // Applied Thermal Engineering. 2020. P.1-13.

111. Dmitriev, A. V. Separator for Separation of Finely Dispersed Droplets from Gas Flows Generated by Industrial Enterprises / A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, S. V. Dang, and V. L. Nguen // Chemical and Petroleum Engineering. – 2019. – V. 55 – N. 4

– Р. 329-335.

112. Пыталева, О.А. Исследование экологического аспекта при организации транспортных потоков в городах (на примере города Магнитогорска) / О.А. Пыталева, О.В. Фридрихсон, Бердашкевич С.М. Бердашкевич // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2016. Т. 6. № 1. С. 58–64.

113. Николаев, А.Н., Очистка газовых выбросов ТЭС, работающих на твердом и жидком топливе/ А.Н. Николаев, А.В. Дмитриев, Д.Н. Латыпов // Казань: Изд-во ЗАО «Новое знание», 2004. 136 с.

114. Асламова, В.С. Промышленные испытания группового прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли / В.С. Асламова, Асламов А.А. Асламов, П.К. Ляпустин, Д.В. Гендин // Вестник ИрГТУ. 2007. № 2-1 (30). С. 6–8.

115. Sagot, B. Experimental study of cyclone performance for blow-by gas cleaning applications / B. Sagot, A. Forthomme, Bourdonnaye G. Bourdonnaye // Journal of Aerosol Science. 2017. Vol. 110. P. 53–69. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2017.05.009

116. Shuanshi, F. Energy efficiency simulation of the process of gas hydrate exploitation from flue gas in an electric power plant / F. Shuanshi, W. Xi, L. Xuemei, W. Yanhong // Natural Gas Industry B. 2017. No. 6. P. 470–476. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2017.09.009>.

117. Baltrenas, P. Optimization of the New Generation Multichannel Cyclone Cleaning Efficiency / P. Baltrenas, M. Pranskevicius, A. Venslovas // Energy Procedia. 2015. Vol. 72. P. 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.027>.

118. Дмитриев, А. В. Влияние конструктивного оформления элементов прямоугольного сепаратора на эффективность очистки газа от твердых частиц / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, А. А. Галиев // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 9. – С. 58-61.

119. Дмитриев, А.В. Улавливание частиц из дымовых газов прямоугольными сепараторами / А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, В.Л. Нгуен // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 15. С. 78–80.

120. Дмитриев, А. В. Pneumatic conveying installation for finely divided

material transportation / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева // Вестник Иркутского технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 1(132). – С. 151-158.

121. Дмитриев, А. В. Экспериментальные исследования очистки загрязненных газовых потоков от мелкодисперсных частиц в прямоугольном сепараторе / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, Ю. О. Семенова // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 12. – С. 109-112.

122. Дмитриев, А. В. Исследование подачи мелкодисперсного материала в воздухопровод котла при сжигании мазута / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, Э. Р. Зверева // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 3. – С. 47-50.

123. Зинуров, В. Э. Удаление влаги из загрязненного трансформаторного масла в прямоугольных сепараторах / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева, С В Данг, Э. И. Салахова // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 11. – С. 75-79.