ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Мостовенко Любовь Владимировна

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОГО ПОТОКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНЕРЦИОННО-ВАКУУМНОГО ЗОЛОУЛОВИТЕЛЯ НА СТЕПЕНЬ УЛАВЛИВАНИЯ ЗОЛЫ

Специальность 05.14.04 Промышленная теплоэнергетика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, доц. Александр Михайлович Парамонов

Омск – 2020

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ПРОБЛЕМЕ ГАЗООЧИСТКИ 12
1.1. Газоочистные аппараты. Сравнительные характеристики оборудования 15
1.1.1. Механическое пылеулавливание 20
1.1.2. Циклонные осадители 21
1.1.3. Батарейные циклоны 26
1.1.4. Вихревые пылеуловители 29
1.2. Инновационное пылеулавливающее оборудование 30
1.2.1. Квадратный циклон 30
1.2.2. Вихревой пылеуловитель 32
1.2.3. Антициклон 33
1.2.4. Бескамерный прямоточный пылеуловитель 35
1.2.5. Лабиринтный золоуловитель 40
1.2.6. Инерционно-центробежный пылеуловитель 42
1.2.7. Центробежный золоуловитель 44
1.2.8. Струйно-фильтрационный пылеуловитель 46
1.3. Инерционно-вакуумный золоуловитель 47
1.3.1. История создания установки 47
1.3.2. Полупромышленный первый образец ИВЗ 47
1.3.3. Обработка зависимостей эффективности пылеулавливания 51
Выводы к главе 1 58
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ ЗАПЫЛЕННЫХ ПОТОКОВ 59
2.1. Разработка математической модели и процесса движения запыленного

потока 59
2.2. ANSYS как средство замыкания и решения математической постановки задачи 71
2.2.1. Метод контрольных объемов. Meshing 72
2.2.2. Модуль ANSYS CFX 77
Выводы к главе 2 89
ГЛАВА 3. ВЕРИФИКАЦИЯ 90
3.1. Верификация математической модели на полупромышленном образце ИВЗ первого поколения 90
3.2. Верификация математической модели на образце ИВЗ второго поколения .. 94
Выводы к главе 3 98
ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ИВЗ 99
4.1. Определение степени очистки установки 99
4.2. Конструктивные решения, влияющие на качество улавливания в установке 103
4.2.1. Варианты, проработанные до создания ИВЗ 103
4.2.2. Перемещение направляющего аппарата в вертикальной плоскости 106
4.2.3. Секционный рассекатель 107
4.3. Влияние изменения отдельных элементов на эффективность установки 108
4.3.1. Влияние высоты поворотной камеры на эффективность улавливания установки 108
4.3.2. Влияние высоты рассекателя на эффективность улавливания установки . 111
4.3.3. Влияние высоты колец на эффективность улавливания установки 112
4.3.4. Влияние высоты конфузорного участка на эффективность улавливания установки 113
4.3.5. Осенесимметричность как свойство, нарушающее эффективность улавливания 115
4.3.6. Влияние высоты входного патрубка на эффективность улавливания установки 118

Выводы к главе 4 119
ГЛАВА 5. НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ 120
5.1. Описание оборудования 120
5.2. Особенности проведения натурного эксперимента 124
5.3. Обсуждение результатов испытаний 133
5.4. Рекомендации по продолжению работы с ИВЗ 141
Выводы к главе 5 142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 144
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 148
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 161
АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ 161
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 162
ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ 162

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с быстрой индустриализацией стран экологическое состояние регионов Сибирского округа находится в тяжелом положении [1]. Повсеместно подвергаются загрязнениям водоемы и плодородные земли. Эти территории можно использовать под золоотвалы. Скопление большого количества угольной золы оказывает пагубное влияние на качество водоемов в виде их подтопления или иссушения. Помимо этого загрязняются сточные и грунтовые воды [2]. Техногенные массивы, полученные в ходе налегания золовой массы на почву, не только сокращают площади земель, пригодные для сельскохозяйственного пользования, но и изменяют гидрогеологический режим района. Человек, как часть природы и экосистемы, наносит своим влиянием большой ущерб окружающей среде [3]. Транспорт и тепловые электростанции также влияют на качество атмосферы. Они выбрасывают в атмосферу около 1 млрд тонн аэрозольных мелкодисперсных примесей и сажи [4]. И хотя повсеместные загрязнения предприятиями практикуются достаточно давно, само понятие «промышленная экология» как дисциплина, которая занималась бы регулированием и поддержанием чистоты окружающей среды посредством антропогенного воздействия на нее, появилась только в начале 80-х гг. XX в. [5, 6].

На территории России расположено более 24 тысяч предприятий, выбрасывающих вредные вещества в атмосферу [7, 8] и водоемы [9]. Из них 29 % приходится на энергетические объекты (таблица В.1), 8 % – объекты угольной промышленности, 33 % выбросов дают предприятия металлургии. Ежегодно в России улавливается и обезвреживается лишь 76 % общего количества вредных веществ. Одними из причин столь низкого обезвреживания являются технологическая отсталость производства; низкие темпы внедрения ресурсосберегающих и других технически совершенных и безопасных технологий; износ оборудования, дости-

гающий в ряде случаев предаварийного состояния; отсутствие нормативно-правовой базы страхования техногенных рисков [10], как видно из таблицы В.1.

Таблица В.1 – Воздействие тепловых электростанций на биосферу в зависимости от применяемого на станции топлива

Топливо	Вредные выбросы	Воздействие на окружающую среду
уголь, мазут	двуокись серы углекислый газ бенз(а)пирен зола	кислотные дожди, парниковый эффект, загрязнение, разрушение экосистем продуктами сгорания, производства и транспортировки топлива
природный газ	двуокись азота углекислый газ	
ядерное топливо	радиоактивность	радиоактивность ниже установленных норм и естественного фона

Из-за станций, работающих на угле, происходит загрязнение близлежащих территорий золой; разрушение экосистем из-за увеличения территории золоотвалов; создание парниковых эффектов вследствие выбросов CO_2; выпадение кислотных дождей из-за выбросов NO_2 с SO_2.

Антропогенное воздействие человека на атмосферу велико, и из-за этого государство вынуждено было выставить нормированные показатели по выбросам, выше которых нельзя загрязнять окружающую среду [11]. Год от года разрабатываются новые государственные программы для фокусировки на актуальных проблемах и их последующих решениях. На реализацию этих программ выделяется значительное финансирование.

Актуальность темы исследования подтверждается государственной программой «Энергоэффективность и развитие энергетики» от 15.04.2014 г. В программе затрагивается вопрос, касающийся снижения антропогенного воздействия топливно-энергетического комплекса на окружающую среду [12]. Исполнителем является Министерство энергетики Российской Федерации. В одной из подпрограмм «Реструктуризация и развитие угольной промышленности», целью которой является стабильное обеспечение внутреннего рынка углем и продуктами его переработки и развитие экспертного потенциала, поставлена задача «развитие

системы промышленной и экологической безопасности в угольной промышленности». Ожидаемыми результатами реализации подпрограммы является «доведение величины удельного выброса загрязняющих веществ в атмосферу на одну тонну добычи до 2,9 кг/т». Разработка инновационного газоочистного оборудования как раз является одним из решений поставленной задачи.

Вклад в промышленную экологию, которая решает вопросы, касающиеся загрязнения атмосферы энергетическими объектами, также осуществляет государственная программа «Технологическая модернизация электроэнергетики России». Одним из ее пунктов является использование инновационных технологий в теплоэнергетике. Разделы программы, напрямую касающиеся рассматриваемого объекта в данной диссертации, входят в пункты «Модернизация ТЭС» и «Разработка и освоение инновационных технологий и оборудования» [13].

Проблема защиты окружающей среды от мелкодисперсных выбросов настолько важна, что ей занимаются не только энергетики, но и экологи, это можно увидеть из государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды» на 2012–2020 гг. Все ее пункты ориентированы на решение одной основополагающей цели «повышение уровня экологической безопасности и сохранение природных систем». В подпрограмме 1 «Регулирование качества окружающей среды», исполнителем которой является Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, указано стремление к росту доли уловленных и обезвреженных, загрязняющих атмосферный воздух, веществ от стационарных источников до 77,4 % [14]. К примеру, в 2017 г. данный фактический показатель был равен 88 %, хотя плановый показатель – 75,4 %.

В связи с необходимостью повышения энергоэффективности станций и улучшением экологической ситуации регионов в РФ осуществляются переводы котлов с твердого топлива на газообразное. Таким образом, можно устранить загрязнения природы золовыми отходами. Однако подобный переход будет весьма дорогостоящим, поэтому большинство российских станций продолжает работать на том топливе, которое изначально было запроектировано тепловым расчетом котла на станции. Таким топливом в Омском регионе является экибастузский уголь.

К характеристикам этого топлива можно отнести высокую теплоту сгорания [15], что положительно влияет на возможность передачи тепла от него к рабочим телам в рамках газовоздушного тракта и высокую зольность. Зола, полученная в процессе горения твердого топлива, имеет широкий спектр гранулометрического состава частиц. Помимо этого, зола экибастузского угля является высокоабразивной, что сказывается на уменьшении долговечности работы конвективных поверхностей котла, а также золоулавливающей установки вследствие эрозионного износа.

Степень разработанности темы исследования составляет 80 %.

Существенный вклад в решение теоретических проблем, вопросов экспериментального, математического моделирования движения запыленного потока в программных модулях внесли Ю. А. Алтухов, Е. М. Пузырев (Институт физико-математического образования, г. Барнаул), С. М. Кисляк, Аль Замили Али Джасим (Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул), Я. В. Чистяков (Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны Министерства обороны РФ, г. Ярославль), Д. Е. Смирнов (Тульский государственный университет, г. Тула), А. В. Сугак (Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль), М. Г. Зиганшин (Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань), В. П. Белоглазов (Омский государственный технический университет, г. Омск).

Однако в опубликованных материалах исследований недостаточное внимание уделено постановке граничных условий при численном моделировании запыленного потока в ANSYS CFX. Большинство ученых занималось исследованиями динамики дисперсных потоков либо в ANSYS Fluent, либо в самостоятельно созданных вычислительных модулях. Особенность данного диссертационного исследования заключается в оценке возможности применения модуля ANSYS CFX для решения задач по расчету эффективности золоулавливающей установки инерционного типа.

Личное участие автора состоит в проведении численных и натурных экспериментальных исследований, разработке проекта эффективной золоулавливающей установки, обобщении результатов экспериментальных и численных иссле-

дований, разработке рекомендаций по использованию результатов исследования.

Целью является проведение расчетно-экспериментального моделирования влияния геометрических характеристик инерционно-вакуумного золоуловителя (ИВЗ) на степень улавливания золы экибастузского угля. Из этого вытекают следующие **задачи**:

1) выполнение математической постановки задачи;
2) выбор граничных условий, максимально адекватно описывающих процесс улавливания золовых частиц;
3) проведение верификации выбранной математической модели;
4) построение конфигурации расчетных моделей с помощью системы автоматизированного проектирования SolidWorks;
5) проведение ряда численных экспериментов, анализ полученных результатов;
6) представление рекомендаций по выбору оптимальных конструкций золоуловителя.

Научная новизна:

1) создание откорректированной модели ИВЗ после проведения натурного эксперимента в тепловой системе «котел – золоуловитель – дымосос – дымовая труба». Новая модель позволяет при той же эффективности (94-99%) работать с большими расходами дымовых газов 110-150 тыс.м^3/ч.

2) уточнена методика расчета движения запыленного потока в части; установлены взаимосвязь между геометрическими параметрами устройства (высота рассекателя, высота конфузорного участка, высота поворотной камеры, высота колец) и параметрами технологического процесса (эффективность установки).

3) выявлен газодинамический эффект — явление реламинаризации потока для создания условий увеличения эффективности улавливания золы за счет устранения или уменьшения поперечных пульсаций золовых частиц; эффект достигается при введении рассекателя. При его наличии пульсаций нет. Наличие рассекателя увеличивает эффективность установки на 35%.

4) согласование результатов численных экспериментальных исследований процессов золоулавливания с результатами натурных экспериментов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты численного моделирования позволили выбрать оптимальную геометрическую форму отдельных элементов установки, благодаря которым достигнута высокая степень улавливания частиц золы. На базе расчетов данной работы выполнен конструктивный проект золоулавливающей установки и получен акт внедрения от ОАО «ВТИ» (Приложение 1).

Результаты численного моделирования рабочего процесса и их верификация с полученными экспериментальными данными позволили разработать рекомендации по увеличению эффективности золоулавливающей установки.

Полученные результаты использовались при разработке НИР (Приложение 2), которая велась с ОАО «ВТИ», с помощью финансовой поддержки фонда «Энергия без границ» (Интер РАО). Результаты исследования применялись для конструирования золоуловителя, установленного на Омской станции СП «ТЭЦ-4» АО «ТГК-11».

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач в диссертации использованы основные теоретические положения теории гидрогазодинамики, расчетов химического состава уходящих газов, рассчитывается эффективность золоулавливающего вспомогательного оборудования промышленного котлоагрегата. Численное моделирование выполнено с использованием программных продуктов Microsoft Excel, ANSYS Meshing, CFX. Верификация используемых моделей турбулентности выполнена на основании полученных автором результатов экспериментальных исследований по аппарату ИВЗ первого поколения для разработки ИВЗ второго поколения.

К **положениям, выносимым на защиту**, относятся:

1) результаты численного эксперимента;
2) верификация ИВЗ второго поколения на уже работающем ИВЗ первого поколения, а также корректное моделирование процессов, протекающих в установке;
3) верификация численного эксперимента на ИВЗ второго поколения относи-

тельно промышленного образца ИВЗ второго поколения;

4) рекомендации по увеличению ресурса работы инерционно-вакуумного золоуловителя.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения и результаты разработанной расчетно-экспериментальной методики докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

1) 6-я международная научно-техническая конференция «Техника и технология нефтехимического производства. Oil and gas engineering 2016», (Омск, 2016 г.);
2) I научно-техническая конференция молодых ученых Уральского энергетического института (Екатеринбург, 16–20 мая 2016 г.).
3) международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин», международная конференция, (Омск, 16–20 ноября 2016 г.);
4) III региональная студенческая конференция «Наука и молодежь в XXI веке» (Омск, 5 декабря 2016 г.);
5) Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные вопросы энергетики» (Омск, 17 мая 2018 г.)

Публикации. Материалы диссертации полно представлены в работах, опубликованных соискателем. Основное содержание работы отражено в 25 печатных работах, опубликовано 15 статей из Перечня ВАК, включая 2 статьи в журналах, входящих в международные системы цитирования; получен патент РФ на полезную модель «Инерционно-вакуумный золоотделитель для очистки дымовых газов» № 175570 Бюл. 35 от 11.12.2017.

Внедрение. Для возможности создания и проведения экспериментов на данной установке была заключена хоздоговорная тема № 15001 между ОмГТУ и ОАО «ВТИ» – «Разработка, авторский надзор за монтажом и участие в испытаниях полномасштабного инерционно-вакуумного золоуловителя». Финансирование темы осуществлялось за счет Интер РАО ЕЭС фонд «Энергия без границ».

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ПРОБЛЕМЕ ГАЗООЧИСТКИ

Воздушная среда над городами и крупными промышленными центрами требует непрерывного контроля. Незначительное изменение состава воздуха может повлечь за собой непоправимые последствия [9].

Непрерывно растущее промышленное производство влечет за собой использование различного сырья и топлива. В свою очередь, это увеличивает выброс газов и пыли в атмосферу, усложняет экологическую ситуацию в регионах, увеличивает количество респираторно-дыхательных заболеваний у человека [19].

Существуют два основных источника загрязнения атмосферы: стационарные источники (промышленные предприятия, топливно-энергетический комплекс, сельское хозяйство, горнодобывающая промышленность) и передвижные источники (транспорт). Основными источниками искусственных аэрозольных загрязнений воздуха являются ТЭС. ТЭЦ, обогатительные фабрики, металлургические, цементные, магнезитовые и сажевые заводы [22] потребляют уголь высокой зольности. Под атмосферным загрязнением понимают присутствие в воздухе газов, паров, частиц, твердых и жидких веществ, тепла, колебаний, излучений, которые неблагоприятно влияют на растения, животных, человека, климат, материалы, здания и сооружения. Загрязнение атмосферы может происходить как вследствие преобразования ее компонентов, так и переноса загрязняющих веществ из других частей биосферы. Эти процессы могут иметь природный или антропогенный характер. Вещества, попадающие в атмосферу непосредственно из-за человеческой деятельности, обычно относят к антропогенным выбросам и загрязнителям. В атмосферу Земли ежегодно поступает 150 млн тонн различных аэрозолей, около 1 км^3 пылевидных частиц искусственного происхождения.

Схема электростанции, предназначенная для выработки тепловой энергии, включает в себя систему оборудования: система пылеприготовления – котел – золоуловитель – дымосос – дымовая труба. В данной системе рабочим телом является запыленный поток, или дисперсный поток (дисперсная система). Дисперсная система – это сочетание двух или большего числа фаз (тел), которые практически не смешиваются и не реагируют друг с другом химически. В случае

электростанции дисперсной системой является сочетание газообразной среды и твердой фазы: аэрозоли (пыли, дымы).

Аэрозоль представляет собой дисперсную систему, в которой несущей средой является газ, в частности, воздух, а дисперсной фазой – твердые или жидкие частицы. Наиболее мелкие (тонкие) аэрозольные частицы по размерам близки к крупным молекулам, у наиболее крупных наибольший размер определяется их способностью длительное время находиться во взвешенном состоянии. В атмосфере аэрозольные загрязнения существуют в виде дыма, тумана, мглы или дымки. Значительная часть аэрозолей образуется в атмосфере при взаимодействии твердых и жидких частиц между собой или с водяным паром. Средний размер аэрозольных частиц составляет 1–5 мкм. К аэрозолям относятся пыли, туманы и дымы.

Пылями называют дисперсионные аэрозоли с твердыми частицами, независимо от дисперсности. Под туманами понимают газообразную среду с жидкими частицами как конденсационными, так и дисперсионными, независимо от их дисперсности. Дымами называют конденсационные аэрозоли с твердой дисперсной фазой или включающие частицы и твердые, и жидкие. В последующем изложении материала пылями будут называться потоки с мелкодисперсными частицами золы, а дымовые газы – потоки с крупными частицами золы (свыше < 5 мкм).

Дисперсный состав золы [20] – это характеристика состава твердого топлива, от которого напрямую зависит выбор того или иного газоочистного оборудования [18]. Оседание частиц золы зависит от дисперсности пыли. Крупные частицы оседают быстрее. На частицы размером 0,1–1 мкм оказывают влияние воздушные тепловые потоки и броуновское движение, и они гораздо дольше находятся во взвешенном состоянии, что в разы усложняет их улавливание инерционными аппаратами.

Условно дисперсный состав частиц разделяют на три группы:

1) частицы радиусом больше 10 мкм (грубая пыль), которые можно рассмотреть в микроскоп при малом увеличении;
2) микроскопические частицы радиусом 1–10 мкм, различимые при обычных методах микроскопии;
3) ультрамикроскопические частицы радиусом меньше 1 мкм, видимые в ультрамикроскопе или в электронном микроскопе [19].

Также важным параметром золы является ее плотность. От плотности частиц золы зависит эффективность ее осаждения в гравитационных и центробежных золоуловителях. Чем плотнее частица, тем лучше ее осаждение в аппарате.

Склонность частиц золы к слипаемости определяется ее адгезионными свойствами. Адгезионные свойства могут проявляться только в монослое частиц, осевших на стенках или фильтрующих поверхностях газоочистных аппаратов; из-за очень малой толщины такого слоя не учитываются. Зола классифицируется как неслипающаяся пыль [22].

Каждая взвешенная в воздухе частица подвергается действию противоположно направленных сил – силы тяжести и силы трения частицы о воздух при ее падении. При определенных значениях удельного веса, размера и формы частицы сила трения может уравновесить силу тяжести, а падение ее будет продолжаться с постоянной скоростью по закону Стокса. Формула результирующей скорости Стокса представлена ниже:

$$V_s = \frac{2}{g}\frac{r^2 g\left(\rho_p - \rho_F\right)}{\mu},$$

где F – сила Стокса, Н; r – радиус сферического объекта, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2; ρ_p – плотность частиц, кг/м^3; ρ_F – плотность жидкости, кг/м^3; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Сама же сила Стокса равна $F = -6\pi r\mu w$, где w – скорость частицы, м/с.

При движении частиц в газе происходит их столкновение, при этом отдельные частицы высокодисперсной пыли соединяются (коагулируют) в более крупные частицы, что увеличивает их массу и позволяет быстрее оседать из-за силы тяжести.

Если же дисперсный состав испытываемой золы (пыли) неизвестен, ее необходимо уловить и проанализировать. Диаметр частицы можно определить по скорости ее витания, или падения, в спокойном воздухе. Чем тоньше пыль, тем сложней и дороже приборы, предназначенные для ее улавливания.

В процессах золоулавливания весьма важны физико-химические характеристики золы, а именно: дисперсный (фракционный) состав, плотность, адгезионные свойства, смачиваемость, электрическая заряженность частиц, удельное сопро-

тивление слоев частиц и др. Для правильного выбора золоулавливающего аппарата необходимы, прежде всего, сведения о дисперсном составе золы. Зола обычно является полидисперсной.

1.1. Газоочистные аппараты. Сравнительные характеристики оборудования

При обработке выбросов, содержащих твердые аэрозольные загрязнители, низких величин проскока (1–2 % и менее) можно достичь, как правило, только двухступенчатой очисткой. Для предварительной очистки могут быть применены жалюзийные решетки и циклонные аппараты (иногда для небольших выбросов – пылеосадительные камеры), а для окончательной – пористые фильтры, электрофильтры или мокрые пылеосадители/золоуловители (скрубберы) [22].

В устройствах для очистки аэрозольных выбросов обычно используются разные закономерности улавливания. Благодаря этому общая и фракционная эффективность аппарата достигает более высокого уровня. Используемые способы улавливания на электростанциях представлены ниже:

1) гравитационное осаждение. Частицы золы осаждаются из потока дымовых газов под действием силы тяжести. Для этого необходимо создать соответствующий режим движения запыленного потока в аппарате с учетом размера частиц, их плотности и т. д.;
2) инерционное осаждение. Инерционное осаждение основано на том, что частицы золы и взвешивающая среда ввиду значительной разности плотностей обладают различной инерцией. Аэрозольные частицы, двигаясь по инерции, отделяются от газовой среды. Осаждение под действием центробежной силы происходит при криволинейном движении загрязненного воздушно-газового потока. Под действием возникающих центробежных сил аэрозольные частицы отбрасываются на периферию аппарата и осаждаются [23];
3) эффект зацепления. Частицы аэрозолей, взвешенные в воздушной (газовой) среде, задерживаются в узких извилистых каналах и порах при прохождении воздушно-газового потока через фильтровальные материалы;

4) мокрая очистка. Смачивание поверхности элементов аппаратов водой или другой жидкостью способствует задержанию аэрозольных частиц на данной поверхности;
5) осаждение в электрическом поле. Проходя электрическое поле, частицы аэрозолей получают заряд. Двигаясь к электродам противоположного знака, они осаждаются на них. В практике улавливания аэрозольных частиц находят применение и другие методы: укрупнение частиц в акустическом поле, термофорез, фотофорез, воздействие магнитного поля, биологическая очистка [22].

Золоулавливающее оборудование при всем его многообразии может быть классифицировано по ряду признаков: назначению, основному способу действия, эффективности, конструктивным особенностям. В соответствии с ГОСТ 12.2.043-80 «Оборудование пылеулавливающее» аппараты очистки в зависимости от размеров улавливаемых частиц и эффективности их улавливания разделены на пять классов (таблицы 1.1–1.3).

Таблица 1.1 – Классификация пылеуловителей

Класс аппарата	Размеры эффективно улавливаемых частиц, мкм	Эффективность по массе пыли при группе дисперсности пыли				
		I	II	III	IV	V
I	Более 0,3-0,5	–	-–	–	99,9–80	< 80
II	Более 2	–	–	99,9–92	92–45	–
III	Более 4	–	99,9–99	99–80	–	–
IV	Более 8	> 99,9	99–95	–	–	–
V	Более 20	> 99	–	–	–	–

Таблица 1.2 – Классификация пылеуловителей по размерам эффективно улавливаемых частиц

Класс сепаратора	I		II		III		IV		V
Минимальный размер эффективно улавливаемых частиц, мкм	0,3		2		4		8		20
Группа пыли по дисперсности	V	IV	IV	III	III	II	II	I	I
Медианный диаметр частиц, мкм	менее 1	1–10	1–10	10–40	10–40	40–120	40–120	более 120	более 120
Максимальная степень очистки	80	80–99	45–92	92–99	80–99	99–99,9	95–99,9	более 99,9	более 99,9

Таблица 1.3 – Структурные характеристики различных систем пылеулавливания

Показатели	Пылеуловители					Фильтры	
	Гравитационные	Центробежные		Мокрые		Тканевые	Электрические
		низконапорные	среднепорные	низконапорные	высоконапорные		
Гидравлическое сопротивление	до 100	100–300	750–1250	750–1500	5000–12500	750–1500	100–400
Характерный параметр	m_i	ω		Stk		при d < 0,3 мм D, при d > 0,3 мм Stk	K

Продолжение таблицы 1.3

Показатели	Пылеуловители					Фильтры	
	Гравитационные	Центробежные		Мокрые		Тканевые	Электрические
		низконапорные	среднепорные	низконапорные	высоконапорные		
Зависимость эффективности улавливания от размера частиц	F(d^2C)					при d < 0,3 мм F(C/d), при d > 0,3 мм F(d^2/C)	F(dC)
От температуры	практически не зависит	f(C/μ)		практически не зависит		при d < 0,3 мм F(C/d), при d > 0,3 мм F(d^2/C)	F(C/μ)
От концентрации	не зависит	определяется диаметром аппарата и свойствами пыли		определяется системой водоснабженияи возможными затратами энергии		определяется типом фильтра (обычно не более 20 г/м^3)	предельная $C = \frac{n\rho de}{12\varepsilon E}$
От влажности	не зависит			способствует росту эффективности		не зависит	способствует росту эффективности
Ориентировочный минимальный размер частиц, улавливаемых с высокой эффективностью, мкм	50–40	40–30	25–8	5–2	1–0,1	0,1	1,0–0,25

Окончание таблицы 1.3

<table>
<tr><th rowspan="3">Показатели</th><th colspan="5">Пылеуловители</th><th colspan="2">Фильтры</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Грави-тацион-ные</th><th colspan="2">Центробежные</th><th colspan="2">Мокрые</th><th rowspan="2">Тканевые</th><th rowspan="2">Электричес-кие</th></tr>
<tr><th>низко-напор-ные</th><th>средне-напор-ные</th><th>низко-напор-ные</th><th>высоко-напорные</th></tr>
<tr><td>Максимально допустимая температура газа, °С</td><td colspan="5">определяется материалом,
из которого изготовлен аппарат</td><td>определяется материалом фильтрующей перегородки (< 220–250)</td><td>определяется составом газа и свойствами пыли</td></tr>
<tr><td>Нижняя предельная температура газа</td><td colspan="3">выше точки росы</td><td colspan="2">любая</td><td colspan="2">выше точки росы</td></tr>
<tr><td>Стойкость к коррозии</td><td colspan="3">достаточно стойки</td><td colspan="2">при наличии в газах кислот, щелочей требуется антикоррозионная защита</td><td colspan="2">стойки при температуре, превышающей току росы</td></tr>
<tr><td>Взрыво- и огнебезопасность</td><td colspan="3">незначительная</td><td colspan="2">минимальная</td><td colspan="2">большая</td></tr>
<tr><td>Ориентировочная стоимость очистки по отношению к низконапорным циклонам</td><td>–</td><td>1,0–1,5</td><td>2,0–3,0</td><td colspan="2">2,5</td><td>3,0–7,5</td><td>5,0–15,0</td></tr>
</table>

Наиболее распространенным оборудованием для улавливания дисперсных частиц из воздушно-газовых потоков являются: сухие гравитационные и инерционные вихревые осадители, фильтры различных конструкций, мокрые пылеуловители, электрофильтры. В целом система очистки газов может содержать оборудование нескольких типов, соединенное в последовательную цепочку по мере повышения эффективности пылеулавливания. Пылеулавливающее оборудование, в котором отделение пыли от газового потока осуществляется последовательно

в несколько ступеней, отличающихся по принципу действия, конструктивным особенностям и способу очистки, относят к комбинированному пылеулавливающему оборудованию.

На практике для эффективного золоулавливания чаще всего применяют аппараты гравитационные, инерционные сухие и мокрые, фильтрующие в пористом слое и в электрическом поле. К основным представителям инерционных сухих пылеуловителей относят жалюзийные устройства, циклоны одиночные и групповые, мультициклоны, а мокрых – промыватели полые и насадочные, пенные, ударно-инерционного действия (струйные, импакторные, ротоклоны), скрубберы Вентури. Пористые фильтры различают по фильтрующему материалу (фильтры из волокнистых – тканых и нетканых, сыпучих материалов, уплотненных металлических и металло-керамических порошков, металлических и полимерных сеток), а затем – по конструкциям, типоразмерам и частным признакам. У электрофильтров основным разделительным признаком считается горизонтальное или вертикальное направление движения обрабатываемого потока. Выбор оборудования при формировании системы пылеулавливания зависит от конкретных требований производства и физико-механических и физико-химических свойств дисперсных частиц [22].

1.1.1. Механическое пылеулавливание

Термин «механические осадители» обычно используют для обозначения устройств, в которых частицы осаждаются под действием либо сил тяжести или инерции, либо и тех и других. В гравитационных осадителях частицы осаждаются из потока газа под действием собственного веса. В инерционных осадителях поток частиц, взвешенных в газе, внезапно подвергается изменению направления движения. Возникающие инерционные силы стремятся выбросить частицы из потока. Циклоны-осадители, в которых используется инерция центробежной силы, являются важным частным случаем инерционных осадителей. Скорость удаления частиц пропорциональна осаждающей силе. Из-за очень малого веса мелких

частиц гравитационное осаждение оказывается слишком медленным и малоэффективным процессом для частиц размером менее 100 мкм. При использовании инерционного эффекта скорость улавливания резко повышается. Благодаря этому можно уменьшить размер оборудования и расширить диапазон эффективного улавливания до частиц размером около 20 мкм. Для некоторых циклонов предельный размер улавливаемых частиц составляет 5–10 мкм. Для осаждения под действием гравитации газ обычно просто медленно пропускают через большую камеру, причем частицы имеют возможность осесть в бункер на дне.

В циклонных осадителях газу придают вращательное или вихревое движение [24]: этого можно достичь или тангенциальным вводом потока в круглую камеру, или пропусканием газа мимо лопастей, радиально ориентированных по отношению к оси потока. Устройства всех этих типов характеризуются простотой конструкции и работы. Они относительно дешевы по сравнению с другими типами осадителей. В общем, они не имеют движущихся частей, а для обеспечения рабочих условий можно использовать любой материал. Затраты энергии на работу также относительно малы, что обусловлено малым перепадом давления при течении газа через устройство. Осадители рассматриваемого типа, используются для первичного удаления грубых частиц газового потока. В большинстве случаев защиты воздуха от загрязнения требуется улавливание гораздо более мелких частиц (размером около 1 мкм), поэтому обычно необходимо применять осадители других типов. Однако механические осадители можно использовать как предварительные, располагая их последовательно с устройствами других типов, чтобы уменьшить нагрузку на последние. Это особенно необходимо при сильно запыленных газовых потоках. Механические осадители могут работать долгое время без обслуживания работниками станции с малыми энергетическими затратами [22].

1.1.2. Циклонные осадители

Наибольшее распространение в системах пылеочистки получили циклоны [25]. На практике система улавливания частиц создается путем придания

запыленному потоку закрученного или вращательного движения, ограниченного цилиндрическими стенками. Частицы осаждаются при отбрасывании на стенки. Такое устройство называется циклоном. Эффективность циклонов [26] можно объяснить на следующем примере. Частица, двигающаяся по круговой траектории по радиусу с тангенциальной скоростью, подвержена действию центробежной силы mw^2/r. Для типичных условий w = 15 м/с, r = 0,6 м эта сила примерно в 39 раз превышает силу тяжести. Поэтому указанная сила может резко увеличить осаждение в камере. Циклоны просты в изготовлении, надежны в эксплуатации при высоких давлениях и температурах, обеспечивают фракционную эффективность очистки на уровне 80…95 % от частиц пыли размером более 10 мкм. Циклоны в основном рекомендуется использовать перед высокоэффективными аппаратами пылеочистки (тканевыми и электрофильтрами). В ряде случаев циклоны обеспечивают эффективность очистки, достаточную для выброса газов или воздуха в атмосферу.

Циклоны делятся на циклоны большой производительности и циклоны высокой эффективности. Первые имеют обычно большой диаметр и обеспечивают очистку значительного количества газов. Вторые – сравнительно небольшого диаметра (до 500…600 мм) [27]. Очень часто применяют групповую установку этих циклонов, соединенных параллельно по газу. Эффективность очистки газа в циклонах в основном определяется дисперсным составом и плотностью частиц улавливаемой пыли, а также вязкостью газа, зависящей от его температуры. При уменьшении диаметра циклона и повышении до определенного предела скорости газа в циклоне эффективность очистки возрастает. Поэтому диаметры серийно выпускаемых циклонов не превышают 5 м. Принято считать, что они обладают сравнительно небольшой фракционной эффективностью в области фракций пыли размером до 5–10 мкм, что является основным их недостатком. Однако циклоны, особенно циклоны высокой эффективности, улавливают не такую уж малую часть пыли размером до 10 мкм – до 80 и более процентов. В современных высокоэффективных циклонах, в конструкции которых учтены особенности улавливаемой пыли, удалось существенно повысить общую и фракционную эффективность очистки. Отмеченный выше недостаток обусловлен особенностями работы

циклонов, в частности, турбулизацией потока запыленных газов, который препятствует сепарации пыли. Большое число различных типов циклонов, которые отличаются друг от друга формой, соотношением размеров элементов и т. д., разработано и применяется в технике обеспыливания.

Циклоны относятся к высокопроизводительным аппаратам, а конические циклоны – к высокоэффективным. Диаметр цилиндрических циклонов обычно не превышает 2000, а конических – 3000 мм. С увеличением диаметра циклона при постоянной тангенциальной скорости потока центробежная сила, воздействующая на пылевые частицы, уменьшается, и эффективность пылеулавливания снижается. Кроме того, установка одного высокопроизводительного циклона вызывает затруднения из-за его большой высоты. В связи с этим в технике пылеулавливания широкое применение нашли групповые и батарейные циклоны.

Конструктивно циклоны могут быть выполнены одиночными, групповыми и батарейными (рисунок 1.1). Среди одиночных и групповых циклонов наибольшее распространение получили циклоны НИИОГаза типов ЦН-15 и СК-ЦН производительностью 600…230 000 м^3/ч, а среди батарейных циклонов – типов БЦ-2, ПБЦ, ЦБ-254 Р, ЦБ-150у производительностью от 12 000 до 480 000 м^3/ч. Эффективность очистки в батарейных циклонах выше, чем в одиночных или групповых, так как в них циклонные элементы имеют значительно меньший диаметр при равных производительностях. Запыленный поток поступает в циклон через патрубок, очищенный — удаляется через выхлопную трубу. В зависимости от способа подведения газа к циклону различают циклоны с тангенциальным и спиральным подводом газа. При прочих равных условиях циклоны со спиральным подводом обладают более высокой эффективностью очистки. Поток запыленного воздуха входит в корпус циклона обычно со скоростью 14…20 м/с. Применяют циклоны правые (вращение потока запыленного воздуха по часовой стрелке, если смотреть сверху) и левые (вращение против часовой стрелки). Скорость газа в свободном сечении цилиндрической части циклонов изменяется в пределах 2,5…3,5 м/с. В обычных условиях оптимальной считается скорость 3,5 м/с, а скорость 2,5 м/с рекомендуется принимать при работе с абразивной пылью.

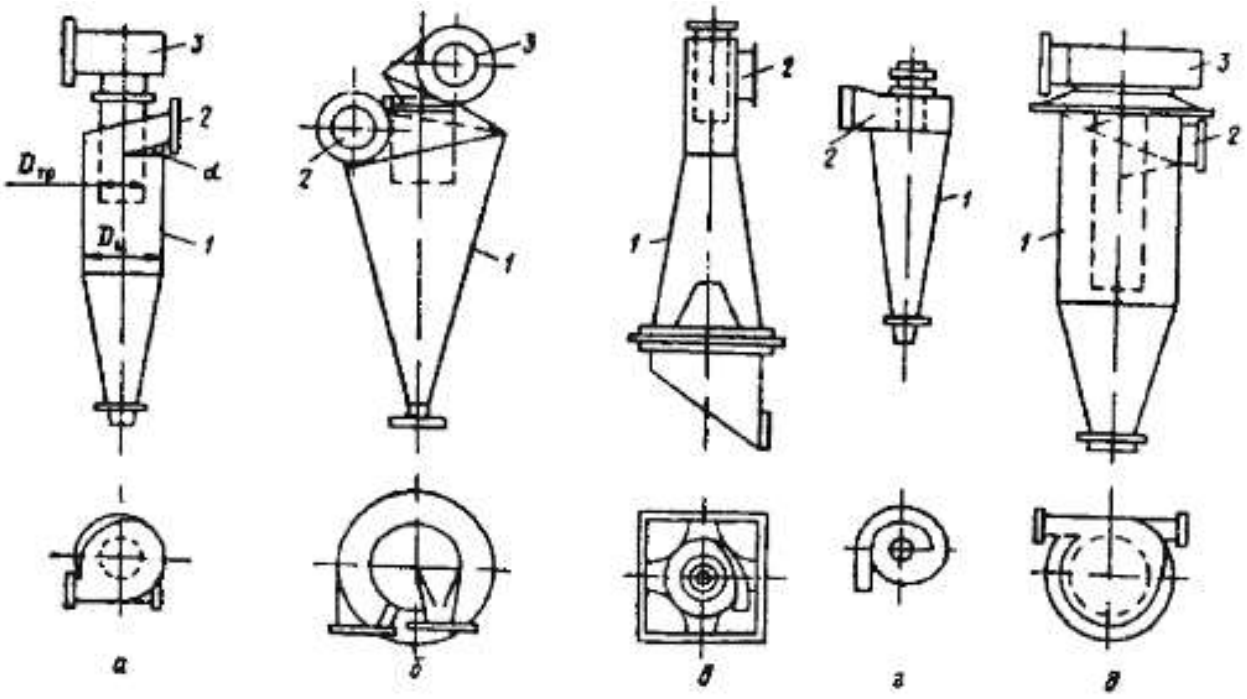


Рисунок 1.1. – Основные типы конструкций циклонов:
а – циклон НИИОГаза; *б* – СИОТ; *в* – ВЦНИИОТ; *г* – СК-ЦН-34; *д* – ЛИОТ;
1 – корпус; *2* – входной патрубок; *3* – выходная улитка

Запыленные газы подаются в циклоны [28] через тангенциальные или аксиальные завихрители и совершают внутри аппаратов сложное вращательно-поступательное движение, характеристики которого изучены еще недостаточно. На частицы, взвешенные в потоке внутри циклона, действует сила инерции, которая стремится сместить их с криволинейных линий тока по касательным, направленным под некоторым углом вниз и к стенке корпуса. Частицы, соприкасающиеся с внутренней поверхностью стенки под действием сил тяжести, инерции и опускающегося газового потока скользят вниз и попадают в пылеприемник (бункер). Частицы, не достигшие стенки, продолжают движение по криволинейным линиям тока и могут быть вынесены из циклона газовым потоком, который может захватить и некоторое количество осевших в бункер частиц. Упрощенно считая, что траектории движения взвешенных частиц близки к окружностям, можно величину возникающей силы инерции принять пропорциональной квадрату тангенциальной скорости, массе частиц и обратно пропорциональной радиусу вращения. Так, при радиусе вращения менее метра и тангенциальной скорости

в пределах 10–15 м/с сила инерции на порядок превосходит силу тяжести. По этой причине сепарация частиц в циклонах происходит намного интенсивнее, чем в гравитационных осадителях. Поскольку инерционная сила пропорциональна массе, то мелкие частицы улавливаются в циклонах плохо. Степень очистки аэрозолей с размерами частиц свыше 10 мкм находится в пределах 80–95 %, а более мелких частиц – намного хуже. Увеличение эффекта осаждения частиц за счет уменьшения диаметра циклона и повышения скорости потока возможно до некоторых пределов, ограниченных техническими и экономическими факторами, такими как рост энергетических затрат, ухудшение очистки вследствие повторного захвата отсепарированных частиц, абразивный износ, увеличение металлоемкости и другими. Для широко распространенных циклонов оптимальные значения скоростей потоков и конструктивных параметров установлены опытным путем и приводятся в справочной литературе.

Конструкции циклонов. Циклоны НИИОГаз

В институте НИИОГаз разработан ряд конструкций цилиндрических и конических циклонов. Широкое распространение получили цилиндрические циклоны ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24. Цифровое обозначение циклона соответствует углу наклона крышки аппарата и патрубка, подводящего запыленный поток. Для данных циклонов характерна удлиненная цилиндрическая часть корпуса. Циклон ЦН-15у имеет укороченную коническую часть. Его применяют при ограничении по высоте, он имеет несколько худшие показатели, чем ЦН-15.

Циклон ЦН-11 предназначен для очистки воздуха (газов) от сухой неслипающейся неволокнистой пыли, образующейся в различных помольных и дробильных установках и при транспортировании сыпучих материалов. Для улавливания взрывоопасной и легковозгораемой пыли циклоны ЦН должны быть выполнены по специальным чертежам и не иметь узлов, где могло бы происходить скопление

пыли, и должны быть снабжены необходимым количеством взрывных клапанов. Цилиндрические циклоны ЦН [29] в зависимости от требуемой производительности можно устанавливать одиночно или компоновать в группы по два, четыре, шесть, восемь циклонов.

Такие циклоны применяют для улавливания сухой неслипающейся, не волокнистой и абразивной; а также слабослипающейся (сажа, тальк) пыли. Пылегазовый поток проходит в бункер через кольцевую щель между двумя соосными конусными поверхностями. Обеспыленный газ (воздух) возвращается в корпус циклона через отверстие в вершине внутреннего конуса.

1.1.3. Батарейные циклоны

При необходимости обеспечения большой пропускной способности используют батарейные циклоны (мультициклоны). Они состоят из циклонных элементов, объединенных в одном корпусе и имеющих общий бункер. Подключение циклонов параллельное от общего коллектора загрязненных газов, отвод очищенного газа также объединен. Циклонные элементы могут быть с возвратным потоком или прямоточные. Прямоточные элементы обладают всеми недостатками аналогичных одиночных циклонов и используются реже возвратно-поточных. В отечественных циклонных элементах подвод загрязненных газов производится коаксиально через завихрители типа «винт» и «розетка» (рисунок 1.2, *а* и *б*) или тангенциально через укороченные улитки (рисунок 1.2, *в*); четырехзаходный улиточный (рисунок 1.2, *г*). Розеточные завихрители по сравнению с винтовыми обеспечивают более высокую очистку газа, но в большей степени подвержены забиванию пылью. Для пылей третьей группы слипаемости направляющие типа «розетка» не рекомендуются, а пыли четвертой группы (сильнослипающиеся) вообще нежелательно очищать в батарейных циклонах.

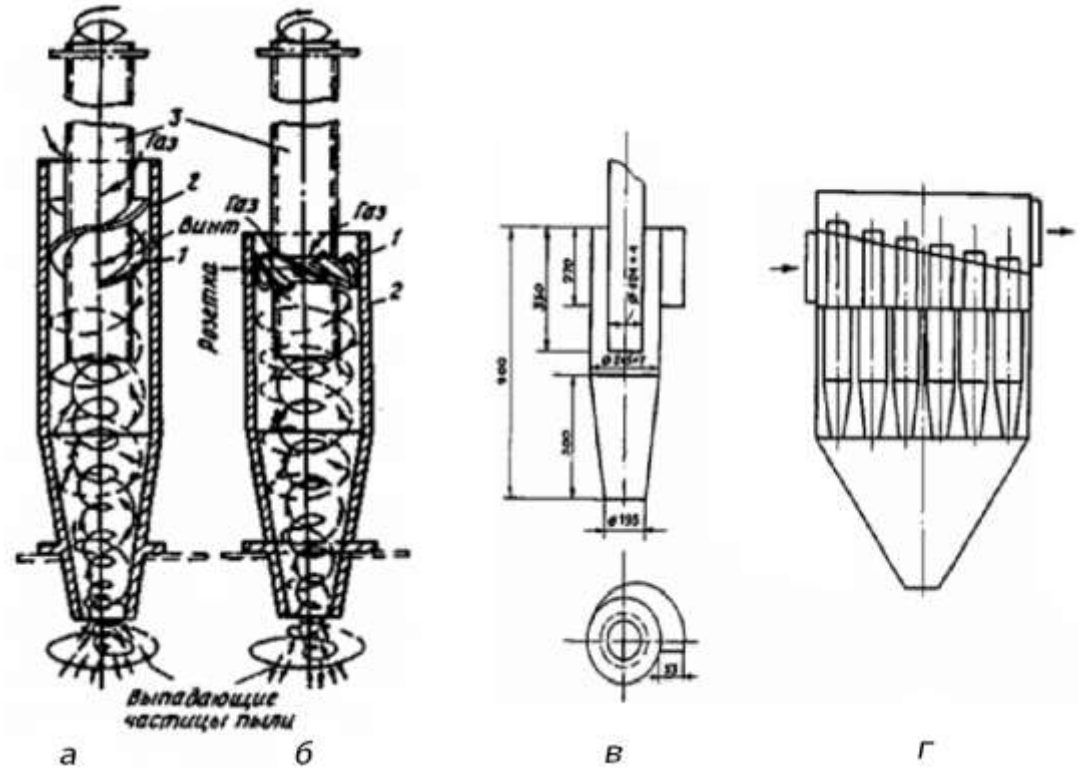


Рисунок 1.2 – Циклонные элементы батарейного циклона:

а – с направляющий аппаратом типа «винт»; *б* – с направляющим аппаратом типа «розетка»;

в – вход через укороченные улитки; *г* – четырехзаходный улиточный вход

Десятки всяческих вставок были опробованы инженерами и учеными для разрушения восходящего вихря, но в результате лишь увеличивалось сопротивление циклонов, а степень пылеулавливания повышалась крайне мало, а то и вообще становилась меньше.

Циклонный эффект возникает в очень большом диапазоне скоростей от нескольких метров до нескольких десятков метров в секунду. Поток запыленного воздуха, войдя в циклон со скоростью всего лишь 5 м/с может создать в его конусной части вихрь, а при уменьшении радиуса вращения за счет сохранения массы движения в нижней части конуса скорость достигнет своего максимального значения.

Однако центробежная сила, которая так полезна для выделения пыли из потока, вредно влияет на окончательный выход пыли из циклона [30]. Дело в том, что газ тоже имеет свою массу, и при вращении в циклоне частицы газа, как и пылинки, стремятся к стенкам. В центре циклона возникает разреженное пространство. Оно располагается по вертикальной оси циклона от трубы для входа очищенного

воздуха до пылевыпускного отверстия. Вот это разрежение – проблемная зона циклона. Она захватывает часть пыли, выходящей из нижнего отверстия, и частицы пыли направляются к выходу [19].

Многоступенчатый циклон, или вихревая труба (рисунок 1.3) – это не что иное, как реконструированный классический циклон, известный много десятков лет. Но очистка газа в нем не ограничивается только вихрем во внешнем цилиндрическом корпусе. Тридцать пять лет назад французский инженер Жозеф Ранк, исследуя модель обычного циклона, заметил, что в центре вихря температура, а следовательно, и давление значительно ниже, чем у краев. Вот почему часть пыли, вращающаяся в конусной части циклона, засасывается обратно в центр и вылетает в трубу. Это свойство напрямую можно использовать для увеличения эффективности циклона.

Рисунок 1.3 – Труба Ранка

В выбросной трубе циклона была установлена конусная вставка с закрепленным патрубком. Между вставкой и патрубком вварили косые направляющие лопатки. Получился еще один циклон, в который газ поступал после завершения первого цикла во внешнем корпусе. Дополнительный корпус стал вылавливать из газового потока частицы, которые не успел поймать внешний корпус.

Конусная часть внутренней вставки циклона соединяется воздуховодом небольшого диаметра с всасывающим патрубком вентилятора, который гонит в циклон пыль. А если на этом воздуховоде поставить еще маленький циклон, то система будет не только ловить пыль, но и сортировать ее по фракциям. Во внешнем корпусе будет улавливаться крупная пыль, а в маленьком циклоне [31] – мелкая [19]. Новый циклон имеет и небольшое сопротивление, и высокую эффективность. В нем улавливается до 99 % пыли с диаметром частиц

до нескольких микрометров. Многоступенчатые циклоны используют в системах пневмотранспорта коксохимических заводов, целлюлозно-бумажных комбинатов и котельных, работающих на угольной пыли.

1.1.4. Вихревые пылеуловители

Вихревые пылеуловители появились в промышленности в 50-х гг., но, тем не менее, они успели получить значительное распространение. В вихревом пылеуловителе, как и в циклоне, сепарация пыли основана на использовании центробежных сил. Основным их отличием от циклонов является наличие вспомогательного закручивающего газового потока. Бывают два вида вихревых пылеуловителей: 1) сопловые; 2) лопаточные.

В аппарате того и другого типа запыленный газ поступает в камеру через входной патрубок с завихрителем типа «розетка» и обтекателем. В кольцевом пространстве между корпусом аппарата и входным патрубком расположена подпорная шайба, которая обеспечивает безвозвратный спуск пыли в бункер (рисунок 1.4).

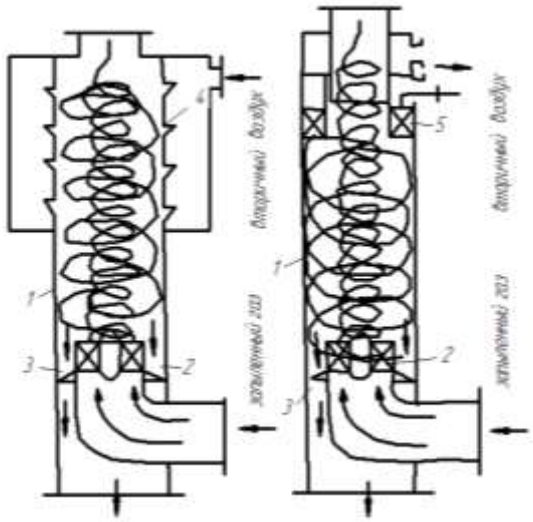


Рисунок 1.4 – Вихревой пылеуловитель:

а) сопловой; *б)* лопаточный тип; *1* – камеры, *2* – лопаточный завихритель; *3* – подпорная шайба; *4* – сопла; *5* – кольцевой лопаточный завихритель

В вихревом аппарате соплового типа запыленный поток закручивается лопаточным завихрителем и двигается вверх, подвергаясь при этом воздействию

вытекающих из тангенциально расположенных сопел струй вторичного газового потока. Под действием центробежных сил взвешенные в потоке частицы отбрасываются к периферии, а оттуда – в возбуждаемый струями вихревой поток вторичного газа, направляющий их вниз в кольцевое межтрубное пространство. Обтекатель направляет поток газа к периферии. Пылевые частицы за счет воздействия центробежных сил перемещаются из центральной части потока к периферии.

Вихревой пылеуловитель [32] лопаточного типа отличается тем, что вторичный поток вводится в верхней части аппарата через завихритель. В аппарате лопаточного типа вторичный газ, отобранный с переферии очищенного потока, подается кольцевым направляющим аппаратом с наклонными лопатками. По основным показателям аппараты лопаточного типа оказались более эффективными [22].

Высокая эффективность из-за использования центробежных сил (98–99 %) при производительности от 330–30000 м^3/ч.

1.2. Инновационное пылеулавливающее оборудование

В процессе научного поиска по данной проблематике в базах данных публикаций России выявлено восемь основных разработок инновационных конструкций золоуловителей. Все оборудование запатентовано, а с некоторыми опытными лабораторными образцами проведены натурные эксперименты. Особенность всех нижеприведенных циклонов в том, что устанавливаются они в одну ступень. Эффективность улавливания каждого свыше 90 %. Рассмотрим подробнее конструкционные особенности каждого вида золоуловителя.

1.2.1. Квадратный циклон

Заслонка в трубе направляет дым через отводящий патрубок в золоуловитель. Здесь он попадает в своеобразный лабиринт, образованный тремя конусами, соединенными между собой сваркой. Совершая спиральные витки, газ движется вверх к выхлопной трубе. Твердые частицы пыли, удельный вес которых больше,

чем у газа, под действием центробежной силы ударяются о стенки лабиринта и падают в бункер. Очищенный же от золы газ беспрепятственно возвращается в трубу.

Эффективность пылеулавливания выше 90 %. Это позволяет квадратному циклону иногда конкурировать с дорогими установками. Эксплуатация золоуловителя Ярина [19] (рисунок 1.5) настолько проста, что запуск его не потребовал ни одной дополнительной штатной единицы.

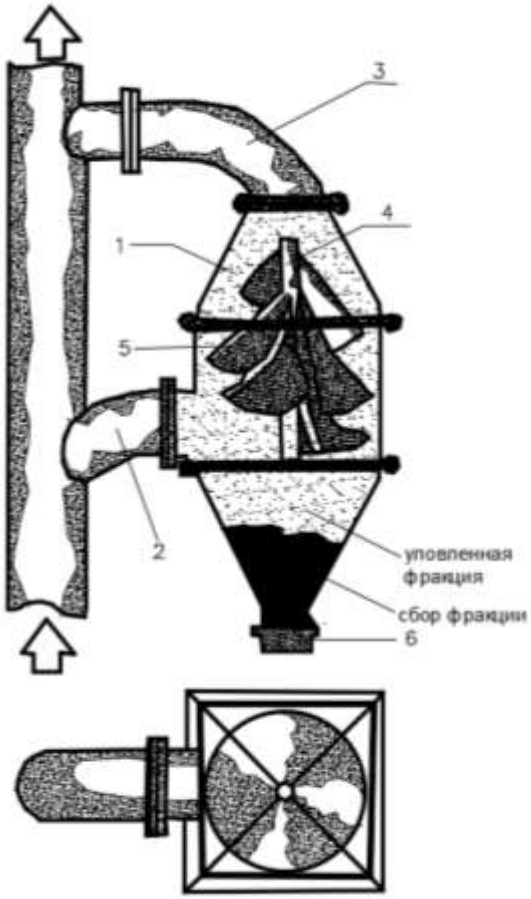


Рисунок 1.5 – Квадратный циклон (золоуловитель Ярина):
1 – корпус; *2* – входной патрубок; *3* – выходной патрубок; *4* – ось спирали;
5 – спираль; *6* – затвор

В настоящее время испытаны почти все возможные варианты взаимодействия центральной трубы с циклоном. Эффект неизменно положительный. В некоторых случаях такая реконструкция позволит заменить вторую ступень очистки, например, такие как скруббер, или рукавный фильтр.

1.2.2. Вихревой пылеуловитель

Вихревой пылеуловитель [33] (авторское свидетельство № 956027 [34]), изобретенный А. Б. Лапшиным, сотрудником Научно-исследовательского и проектного института по газоочистным сооружениям, технике безопасности и охране труда в промышленности строительных материалов, отличается тем, что входной патрубок (рисунок 1.6) для запыленного газа у него выполнен в виде улитки с осевым отверстием, через которое избыток давления из бункера эжектируется выходящим вихрем. Вторым отличием изобретения признано то, что поток вторичного воздуха (газа) подается на закрутку не через сопла, а, как в обычном циклоне, через тангенциально установленный патрубок *11*. Вторичный газ, поступая в вихревой пылеуловитель, создает кольцевую воздушную завесу, которая частично перекрывает выходной патрубок, установленный по центру корпуса. Чем надежней это перекрытие, тем выше степень очистки в вихревом пылеуловителе.

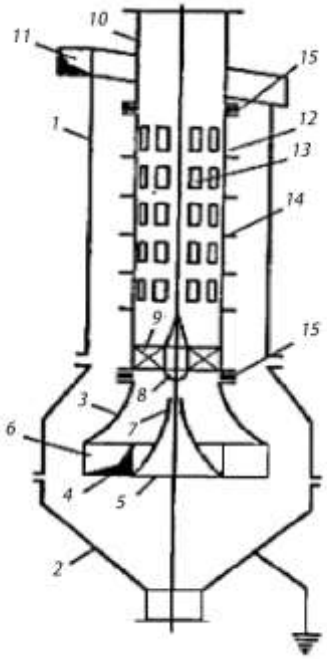


Рисунок 1.6 – Вихревой золоуловитель:

1 – вихревая камера, *2* – бункер, *3* – камера для ввода газов, *4* – днище, *5* – осевое отверстие, *6* – тангенциальный входной патрубок, *7* – раструб, *8* – обтекатель, *9* – завихритель, *10* – выхлопной патрубок, *11* – устройство для вспомогательного потока газов, *12* – труба, *13* – отверстия на наружной поверхности, *14* – иглообразные электроды, *15* – диэлектрические прокладки, изолирующие участок конструкции от других узлов

Для вихревых пылеуловителей небольшого диаметра подачи вторичного воздуха (газа) с периферии корпуса достаточно, но когда вихревой пылеуловитель имеет большой диаметр, боковые струи воздушной завесы быстро затухают, и в центре корпуса образуется как бы «глаз торнадо» – зона низкого давления, в которую засасывается мелкодисперсная пыль [19].

Согласно уравнению Д. Бернулли чем выше скорость, тем меньше статическое давление в данной точке. В этом случае давление упало настолько, что в воде образовалась воронка. Значит, скорость возросла до максимума, а давление упало до минимума. Температура тоже минимальная. Войдя в улитку, поток воздуха имел большой запас тепловой энергии, а затем, по мере продвижения к центру, преобразовался в кинетическую энергию [9].

1.2.3. Антициклон

Казалось бы, циклон – идеальный аппарат для обеспыливания газов. Но в самом его принципе есть такие противоречия, которые в некоторых случаях сводят на нет все его положительные качества. Для того чтобы развить в циклоне большую скорость запыленного потока и создать достаточную для отделения пыли центробежную силу, нужно затратить энергию. Чтобы частицы пыли образовали на стенках корпуса винтовую спираль и ссыпались в конусную часть, тоже нужна энергия. Чем больше витков спирали образует запыленный поток, тем больше для этого требуется энергии.

«Антиконструкция» к этому аппарату родилась совершенно случайно. В поисках способа улавливания пыли пришлось сделать все наоборот: подавать запыленный поток не по касательной к корпусу циклона, а по его вертикальной оси. Очищенный же воздух отсасывать из патрубка, который раньше назывался входным. Циклон сделали стеклянным с подвижным входным патрубком, расположенным по вертикальной оси так, что его торец был направлен на отверстие для выгрузки улавливаемого материала. С первых же мгновений испытания стало ясно, что налицо совершенно новый эффект. Парусная пыль при повышении

скорости воздуха не тянется послушно за ним, как в обычном циклоне, а с резким хлопком вылетает в пылевыпускное отверстие. И наоборот, при понижении скорости она, не достигая отверстия, делает поворот кругом и уходит в вытяжной патрубок.

Вот первое и основное отличие нового пылеуловителя от всех его старших собратьев. Ведь и в оросительных камерах, и в электрофильтрах, и в ультразвуковом аппарате, и во всех прочих системах пылеуловителей стоит увеличить скорость прохождения газового потока выше нормы, как сразу ухудшается эффект пылеулавливания. В антициклоне же все наоборот: чем выше скорость потока, тем сильнее летят частицы пыли в отверстие для выгрузки. Из этого следует, что можно сконструировать сверхкомпактный пылеуловитель, ведь площадь его сечения будет уменьшаться пропорционально росту скорости воздушного потока.

Таким образом была достигнута первая цель технической задачи – компактность аппарата. Практически он будет занимать вдвое меньше места, чем обычный циклон, вдвое меньше пойдет на его изготовление листовой стали. Следовательно, и цена его будет значительно ниже. Остается подсчитать эксплуатационные затраты. Для преодоления сопротивления обычного циклона расходуется часть электроэнергии, потребляемой мотором вентилятора. Чем выше сопротивление циклона, тем больше электроэнергии уходит на его преодоление. У антициклона сопротивление в два с лишним раза меньше, чем у обычного циклона.

По такому же принципу был сконструирован еще один пылеуловитель, названный двухступенчатым. В нем сочетается обычный циклон с антициклоном. В антициклоне чем выше парусность (чем больше мелких частиц), тем эффективнее улавливание пыли.

Антициклон (рисунок 1.7) в чистом виде уже сейчас способен заменить громоздкие пылеосадочные камеры и сетчатые фильтры, устанавливаемые на текстильных предприятиях в системах кондиционирования воздуха перед оросительными камерами. Большую пользу он принесет и в пневмотранспорте, если его использовать вместо циклонов-разгрузителей [19].

При возникновении вопроса, можно ли в центральную трубу антициклона подавать воздух со скоростью 50 м/с можно ответить утвердительно: чем выше скорость, тем выше и степень очистки воздуха.

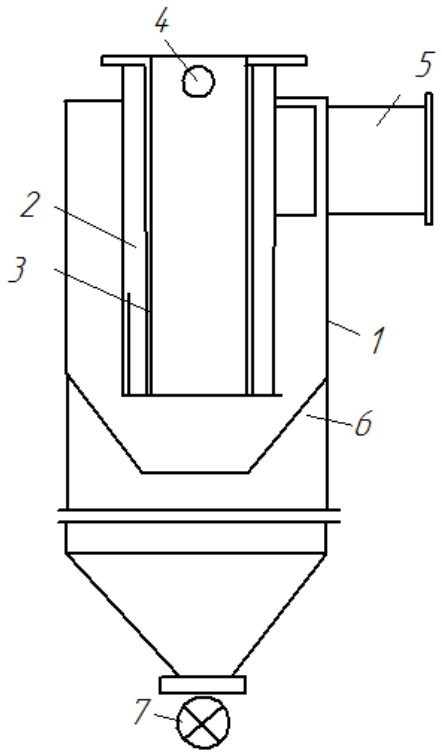


Рисунок 1.7 – Антициклон:

1 – корпус; *2* – входная труба для запыленного воздуха; *3* – кольцевой зазор для входа чистого воздуха; *4* – входной патрубок для чистого воздуха; *5* – выходной патрубок для очищенного воздуха; *6* – конусная перегородка; *7* – пылевыпускной патрубок

1.2.4. Бескамерный прямоточный пылеуловитель

Довольно часто в лабораториях и на опытных установках газ очищается великолепно, а на предприятии выясняется, что уловитель никуда не годится: пыль забивает трубопроводы, налипает на электродах и сетках, и, в конце концов, загрязняет помещение, где установлен фильтр. Сложная конструкция требует тщательной балансировки, регулярной чистки, шлифовки внутренних поверхностей и высокой квалификации обслуживающего персонала. Все это сдерживает ее широкое применение. Поэтому у инженеров-эксплуатационников сложилось убеждение, что хороша лишь предельно простая вещь. Далее представлены вариации улучшения конструкции циклона (рисунок 1.8).

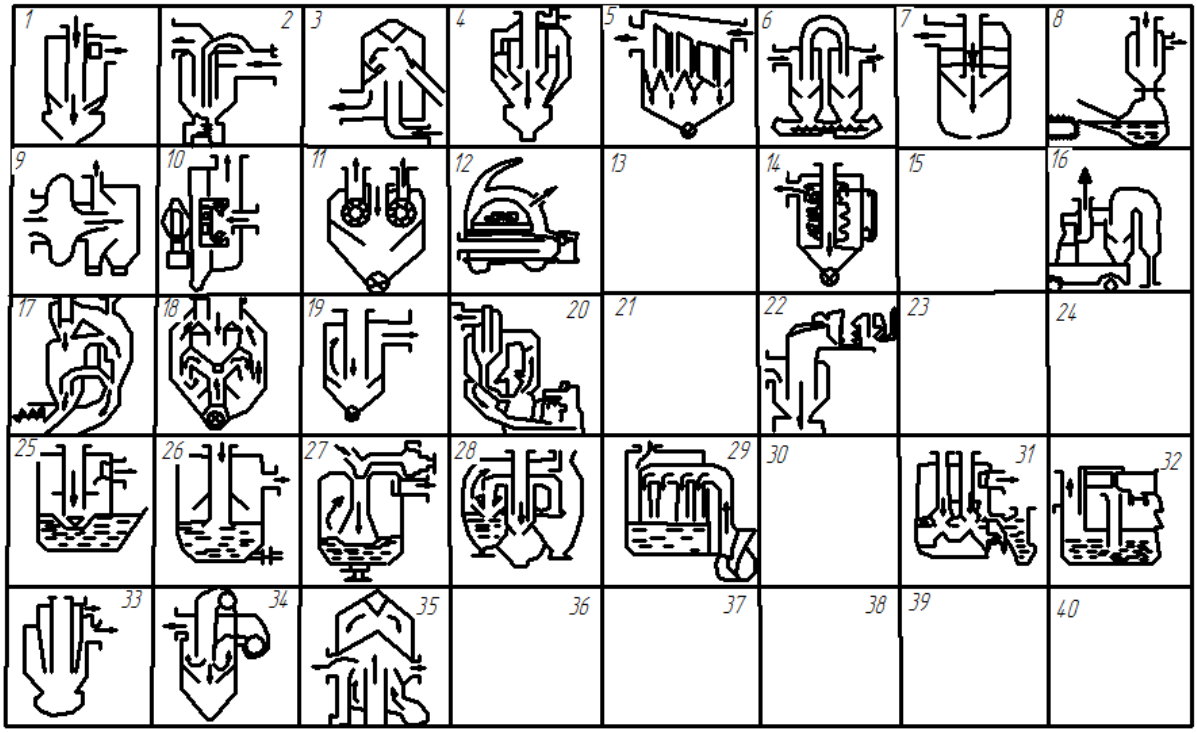


Рисунок 1.8 – Периодическая система антициклонов:

1 – антициклон; *2* – циклон; *3* – антициклон «наоборот»; *4* – двухступенчатый циклон; *5* – антимультициклон; *6* – двухступенчатый пылеуловитель; *7* – магнитный антициклон; *8* – устройство для перегрузки рыбы; *9* – сепаратор мельницы; *10* – ротационный пылеуловитель; *11* – турбофильтр; *12* – антициклонный пылесос; *14* – разгрузитель пневмотранспорта; *16* – уборщик газонов; *17* – шахтный теплообменник; *18* – запечный теплообменник «Робот»; *19* – антициклонный теплообменник с цепной завесой; *20* – многоступенчатый циклон; *22* – циклонный теплообменник; *25* – гидропылеуловитель; *26* – скруббер; *27* – вертикальная шахтная печь; *28* – гидровоздушный циклон; *29* – производство цементного клинкера; *31* – гидродинамический пылеуловитель; *32* – дымогенератор Азчеррыба; *33* – антициклон с воздушной рубашкой; *34* – антициклон с наддувом; *35* – пылеуловитель вагранки

О циклоне на рисунке 1.8, *1* более подробно говорилось в разделе 1.2.3. На рисунке 1.8, *2* показан обычный циклон с частичным ответвлением воздуха из входного патрубка и вводом его в конусную часть. Такой эффект без особых переделок позволяет снизить сопротивление обычного циклона и предотвратить зависание пыли в конусной части. Особенно целесообразно ставить такие трубопроводы в циклонных теплообменниках и циклонах – разгрузителях пневмотранспорта.

Далее показан обычный антициклон (рисунок 1.8, *3*), перевернутый конусом

вверх. Парадоксально, но факт – степень улавливания в нем ничуть не меньше, чем у антициклона *1*. Дело в том, что в эффекте улавливания частиц с помощью осевой струи влияние гравитации почти полностью исключено.

Следующим номером (рисунок 1.8, *4*), идет «Двухступенчатый циклон» (внутренняя вставка антициклона). Поток запыленного воздуха входит через патрубок сразу в антициклон, под действием инерции очищается в нем от крупных фракций, имеющих большую парусность, а затем, через каналы между завихривающими лопастями, выходит в зазор между стенками корпуса и вставки, совершает в нем вращательное движение, под действием центробежных сил освобождается от мелких фракций и удаляется через патрубок. Это типичное «матрешечное» решение технической задачи, когда внутри одного корпуса устанавливается другой. Их эффективности складываются, а сопротивление возрастает незначительно, так как отсутствуют обычные при последовательном подключении воздуховоды.

На рисунке 1.8, *5* показана мультипликация антициклона. Параллельно подключены четыре элемента, хотя их может быть и 16, и 24, и больше. Мультипликация позволяет увеличить общий периметр отверстий входных патрубков и снизить общую высоту установки. При этом возрастает эффективность отделения пыли от воздуха, ведь чем больше периметр, тем меньший слой газа приходится преодолевать пылинке, а чем меньше диаметр входного патрубка, тем меньше при том же соотношении диаметра патрубка к высоте будет общая высота установки.

Под номерами *6* и *7* (рисунок 1.8) показаны варианты наложения электрического и магнитных полей на действие антициклонов. В двухступенчатом пылеуловителе (квадрат *6*), первый циклон которого изготовлен из пластмассы, улавливание происходит постадийно. В первом циклоне пыль вращается, заряжается от трения по стенкам, накатывается в довольно крупные шарики и в антициклоне эффективно улавливается, так как чем выше сечение частиц, тем выше и эффективность их улавливания.

Заканчивается горизонтальный ряд модификаций антициклона наложением магнитного поля на эффективность пылеосаждения. По кольцу внутри и снаружи антициклона расположены постоянные магниты. Между ними помещены желез-

ные опилки, образующие пористый фильтр, в котором эффективно задерживаются все частицы, не осевшие за счет эффекта осевой струи. Под номером *8* (рисунок 1.8) показано довольно неожиданное применение антициклона (предложение Л. П. и С. Л. Шишмаковых) для перекачки рыбы. Такой способ предохраняет ее от повреждений.

Принцип действия пылеуловителей, помещенных во втором ряду, усилен эффектом вращения. Так, в сепараторе мельницы, помещенном в квадрате *9* (рисунок 1.8), в качестве входного патрубка антициклона используется вращающаяся вместе с корпусом мельницы цапфа. Через нее выходит воздушный поток, увлекающий с собой измельченный материал. При этом по инерции крупные фракции пролетают в камеру и возвращаются на домалывание, а мелкие фракции отсасываются через патрубок.

В квадрате *10* изображен ротационный пылеуловитель, в котором вакуум создается чистым отсеком крыльчатки. Запыленный поток поступает через патрубок, по инерции пролетает в грязный отсек крыльчатки и сбрасывается ее лопастями в бункер. Очищенный воздух чистый отсек крыльчатки нагнетает в патрубок. Дополнительный эффект, используемый в установке, заключается в том, что ее крыльчатка одновременно служит и для отделений пыли из потока, и для отсасывания пыли из места ее выделения.

В турбофильтре (квадрат *11* рисунка 1.8) крыльчатки не отсасывают пыль и не побуждают движение пылевоздушного потока, а наоборот, вращаются как турбины этим же потоком. Снаружи крыльчатки обтянуты мелкоячеистой сеткой, на которой оседают пылинки, не выделившиеся из потока по инерции.

В квадрате *12* (рисунок 1.8) показан антициклонный пылесос, а в квадрате *13* не помещены какие-либо конструкции, так как еще ничего не придумано. То же касается и других, пока еще не состоявшихся изобретений, которых ждут белые поля квадратов *15, 21, 23, 24, 30, 36, 37, 38, 39, 40*.

Все изобретения, помещенные в третьем ряду, относятся к области теплопередачи. В основном это устанавливаемые за цементными печами теплообменники. Их принцип действия заключен в обработке поступающей сверху цементной

сырьевой муки встречным потоком газов. Подогретая мука улавливается в элементах антициклонов и направляется во вращающиеся цементные печи. Все указанные теплообменники разработаны совместно с сотрудниками ВНИИцеммаша.

Четвертый ряд таблицы почти полностью заполнен аппаратами, в которых улавливание пыли осуществляется жидкой фазой. Наиболее широко внедрен гидропылеуловитель (квадрат *25*) и скруббер (квадрат *23*, рисунок 1.8), отличающийся тем, что в нем эффект осевой струи усилен косыми лопастями, закручивающими водовоздушную смесь под козырьком. Это способствует более активному массообмену.

В квадрате *27* (рисунок 1.8) показана вертикальная шахтная печь, разработанная совместно с сотрудниками института НИИавтоприбор для производства и эффективного осаждения сверхминиатюрных стеклянных шариков – катафотов. В этой конструкции входной патрубок является одновременно топочным объемом, в котором плазмой оплавляются мельчайшие стеклянные крупинки, тут же превращающиеся в шары и осаждающиеся в слое воды.

В квадрате *28* (рисунок 1.8) новое «матрешечное» решение. Внутрь гидропылеуловителя, состоящего из нескольких сопл, вмонтирован антициклон. Воздух сначала очищается в нем от пыли, а затем поступает в сопла и барботирует через воду. Преимущество такого решения – увеличение периодов времени между чистками.

В квадрате *29* рисунка 1.8 показано устройство для обеспыливания уходящих газов цементных печей, работающих по мокрому способу производства. Уходящие газы из печи направляются к нескольким соплам и, выходя из них, с силой ударяются о зеркало разлитого шлама. При этом около 90 % пыли осаждается на поверхности шлама и вместе с ним поступает обратно в печь.

В квадрате *31* показан гидродинамический пылеуловитель, отличающийся тем, что циркулирующая в нем вода омагничивается и значительно усиливает свои пылеулавливающие свойства.

В квадрате *32* (рисунок 1.8) показано устройство дымогенератора, разработан-

ного в объединении «Азчеррыба». Общий дефект четвертого ряда – сложность удаления пульпы. Достоинство – чистота очистки.

Последний ряд менее всего заполнен, но есть надежда, что уже вскоре для заявок не хватит пустых квадратов, дело в том, что используемый в этом ряду для «промывки» запыленного потока воздух оказывает такое же действие на процесс улавливания, как и вода. В антициклоне (квадрат *33*, рисунок 1.8) чистый воздух засасывается вместе с пылевым потоком и обволакивает его, как завеса, на всем пути движения внутри конуса от кольцевой щели между патрубком и рубашкой до отверстия в бункере.

В квадрате *34* тот же эффект достигается за счет нагнетания чистого воздуха вентилятором, а в квадрате *35* антициклон перевернут. Воздушная завеса в нем также создается отдельным вентилятором. Такое устройство можно закрепить на любой пылящей трубе, но наибольший эффект оно даст именно на вагранках, так как мокрые пылеуловители четвертого ряда на вагранках внедрить трудно из-за агрессивности выбросных газов.

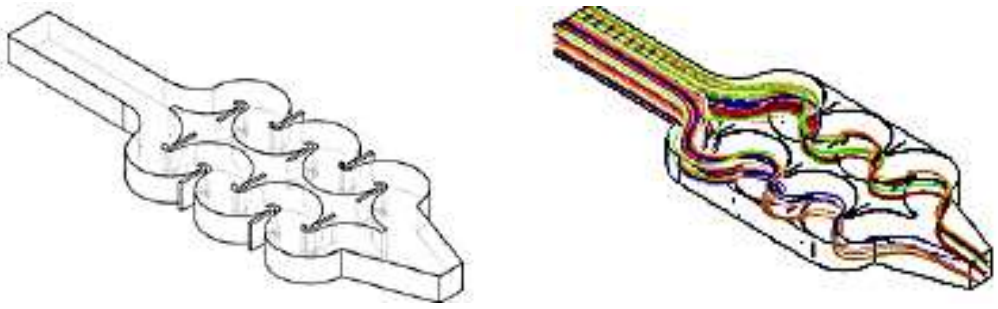
Таким образом, можно продолжать разрабатывать конструкции пылеуловителей с ранее упомянутыми эффектами и пробовать их применять в различных отраслях, заранее стараясь прогнозировать влияние эффектов на качество улавливания засоряющего поток материала.

1.2.5. Лабиринтный золоуловитель

Ранее были показаны золоулавливающие устройства, изобретенные до 2000 г., но имеющие перспективы на внедрение в производство [34]. По сей день инвестируются большие средства на создание новых высокоэффективных технологий, что отражает положительную тенденцию развития данной отрасли. Следующими золоуловителями являются самые известные с точки зрения количества публикаций и цитирований золоуловители, созданные уже после 2000 г. [35]. Один из них – ЛЗУ (лабиринтный золоуловитель).

Разработка золоуловителя велась при поддержке Министерства по использованию природных ресурсов. В программе развития Министерства, действующей до 2030 г., указано, что необходимо расширять возможности использования твердого топлива, так как оно является одним из основных источников энергии для ТЭЦ. Также необходимо улучшать комплекс золоулавливающего оборудования на электростанциях, потому что новый используемый уголь может обладать высокой зольностью.

Конструктивно установка выглядит как два извилистых канала (рисунок 1.9), образованные пластинами в форме полуокружностей, входные и выходные щели образованы с помощью перегородок [36].



а) *б)*

Рисунок 1.9 – ЛЗУ (лабиринтный золоуловитель):
а) трехмерный вид; *б)* разноцветными линиями обозначены траектории движения зольных частиц

В 1995 г. установка была запатентована [37], а в базу РИНЦ статьи по ней поступали с 2011 г. [38, 39, 40, 41, 36] и защищена диссертация [42].

В публикациях доступно отражен принцип работы пылеуловителя. Он состоит в том, что за счет перепада давления между входными и выходными отверстиями часть запыленного потока проходит через улавливающие карманы, где происходит гравитационная сепарация частиц, в то время как в прототипе частицы попадают в улавливающие карманы только по инерции (рисунок 1.10).

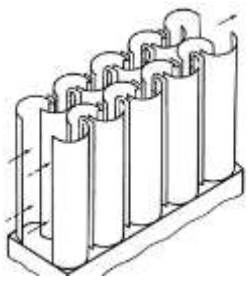


Рисунок 1.10 – Вид сбоку. ЛЗУ [43]

В результате в улавливающие карманы затекает больше частиц (особенно мелких), увеличивается эффективность улавливания карманов и, следовательно, всего пылеуловителя в целом.

1.2.6. Инерционно-центробежный пылеуловитель

Следующий золоуловитель – ИЦП-К (рисунок 1.11). Впервые в базах данных РИНЦ упоминание о нем было в 2006 г., сопровождающееся выпуском патентов [44, 45, 46, 47, 48]. По данной установке были защищены диссертации [49, 50]. Принцип действия установки [51] состоит в том, что газ с частицами пыли через патрубок запыленного газа поступает на завихритель, в котором расположены лопатки, закручивающие пылегазовый поток. Отделившаяся пыль вдоль стенки корпуса поступает в нижнюю часть аппарата и собирается в бункер пыли. Особенность установки также в том, что в ней есть два поворота газа на 180°. Отделение частиц происходит под действием инерционных сил в пространстве между корпусом и экраном, установленным под завихрителем. У ИЦП-К ряд преимуществ [52], таких как низкая металлоемкость, простота в изготовлении и эксплуатации, надежность, сравнительно малые габариты, высокая эффективность, способность работать при высоких температурах. Наибольшая скорость, развиваемая потоком в установке 30 м/с, аэродинамическое сопротивление находится в зависимости от скорости на входном патрубке, доходит до 2300 Па, при входной скорости в 17 м/с и высотой поднятия экранов 0,61 эффективность установки максимальна [53] и равна 98,5 % [49].

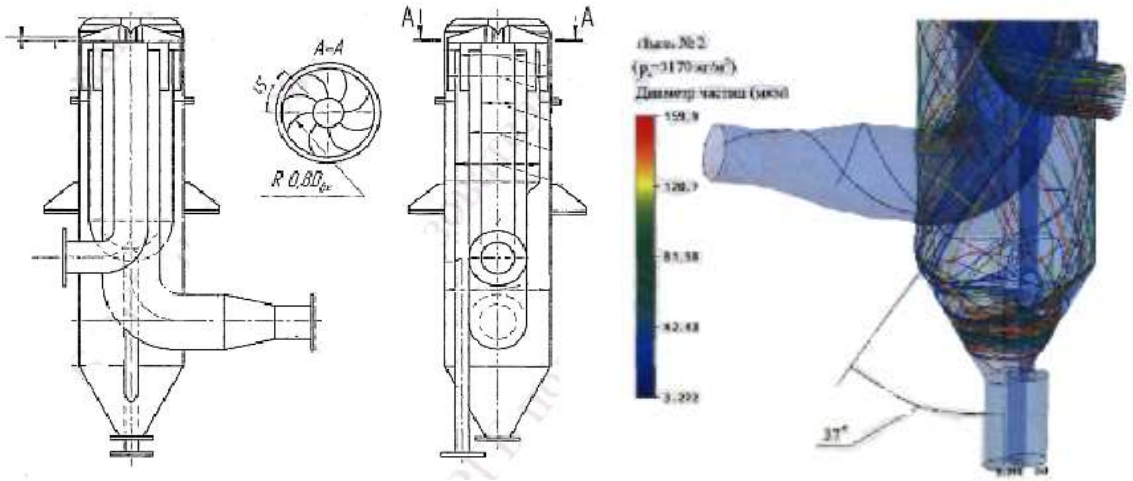


Рисунок 1.11 – ИЦП-К (Инерционно-центробежный пылеуловитель)

Есть вариация ИЦП-К [54] с сужающимися каналами. Аппарат включает корпус, в котором размещен завихритель, выполненный в виде полого диска, состоящего из верхней и нижней стенок. Внутри завихрителя расположены закручивающие лопатки. По оси корпуса проходит патрубок ввода запыленного газа, примыкающий к нижней стенке завихрителя. Концентрично снаружи патрубка ввода установлен патрубок выводы очищенного газа. По наружному нижнему краю диска завихрителя установлен экран в виде усеченного конуса или цилиндра. Из нижней части корпуса уловленная пыль попадает в бункер для сбора пыли. Особое расположение входного патрубка обеспечивает сохранение высокой скорости газа (до 20 м/с) в верхней части аппарата, в отличие от обычных циклонов, где в зоне ввода очищаемого потока скорость падает до 2–4 м/с, существенно уменьшая центробежную силу и тем самым значительно снижая эффективность пылеулавливания.

Исследования [55], проводимые на пылеуловителе при пропускании воздуха с различной скоростью, показали, что резкое возрастание ΔP намечается при скорости газа свыше 22 м/с, поэтому считается, что увеличение скорости выше этого показателя нецелесообразно (рисунок 1.12).

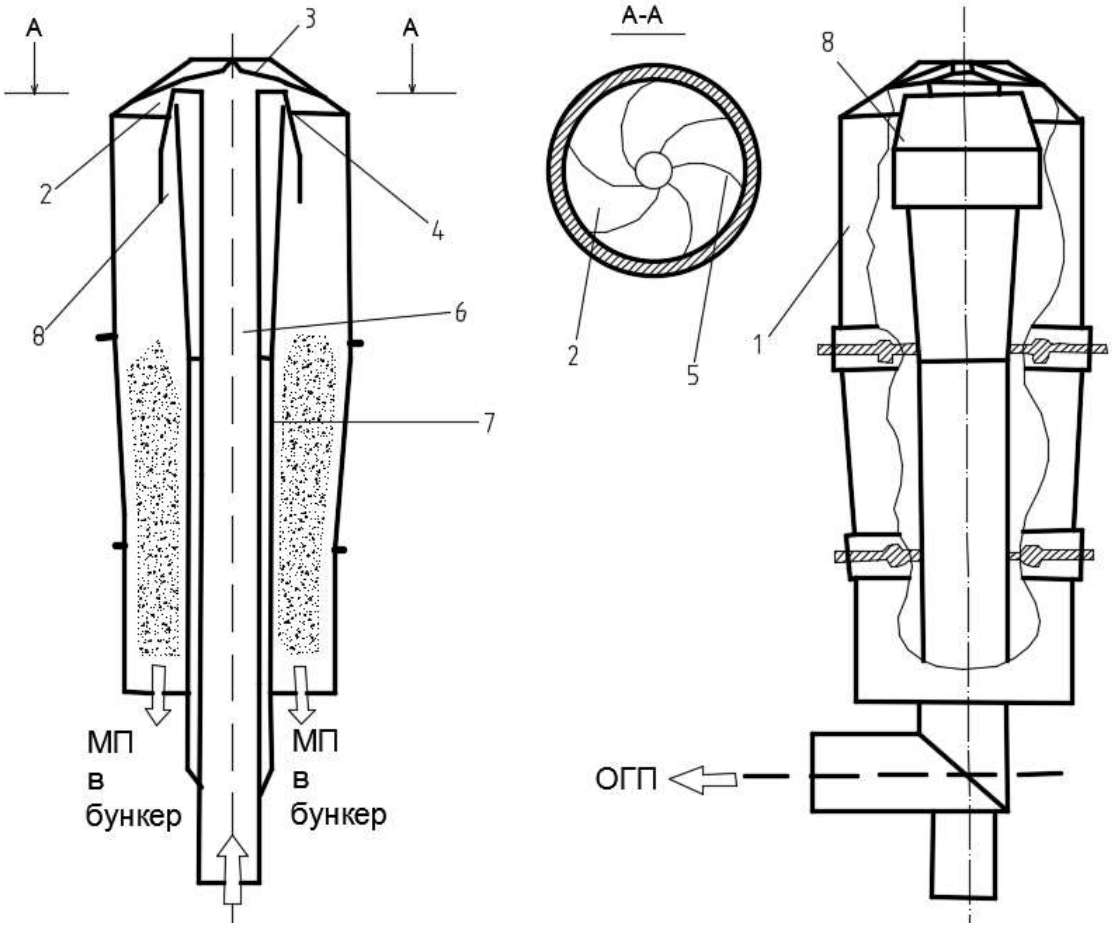
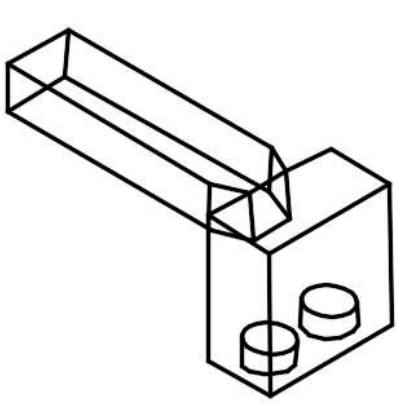


Рисунок 1.12 – Схема центробежно-инерционного пылеуловителя
(стрелками указано направление движения потоков):
1 – корпус; *2* – завихритель; *3* – верхняя стенка завихрителя; *4* – нижняя стенка завихрителя; *5* – закручивающие лопатки завихрителя; *6* – патрубок вводы запыленного газа; *7* – патрубок вывода очищенного газа; *8* – экран; МП – мелкодисперсная пыль;
ЗГП – загрязненный газовый поток; ОГП – очищенный газовый поток [54]

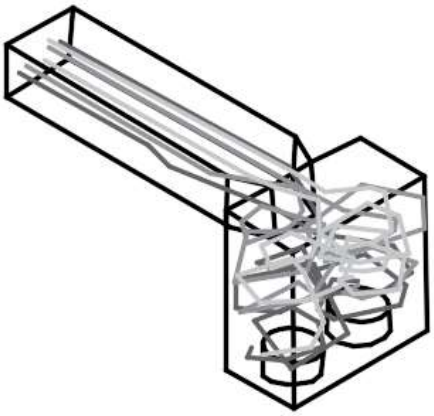
1.2.7. Центробежный золоуловитель

Центробежный золоуловитель (ЦЗУ) с тангенциальным входом (НИЦ ПО «Бийскэнергомаш»), используется непосредственно после котельных установок для улавливания грубых частиц, при этом основными силами, влияющими на очистку потока, являются центробежная сила и сила тяжести [42]. Разработчики ЦЗУ и ЛЗУ одни и те же. Впервые в своей диссертации их упомянул Аль-Замили Али Мирали Джасим в 2012 г. [40].

На рисунке представлен центробежный золоуловитель с закручивателями (рисунок 1.13, *г*) разной высоты (рисунок 1.13, *а, б*), [41]. Чем выше высота закручивателей (до 600 мм), тем больше эффективность установки (до 76 %). Принцип улавливания частиц сводится к тому, что изначально запыленный поток движется по главному входному каналу, а далее встречается с «закручивателями» потока для улучшения аэродинамики потока и повышения эффективности сепарации частиц внутри корпуса [41]. Численные эксперименты проводились в программном модуле STAR-CD.

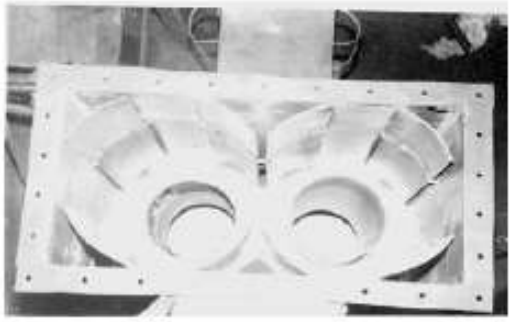


а



б)

в)



г)

Рисунок 1.13 – ЦЗУ (Центробежный золоуловитель):

а) 3D-модель золоуловителя; *б)* траектории движения запыленного потока; *в)* полупромышленный образец ЦЗУ; *г)* завихрители

1.2.8. Струйно-фильтрационный пылеуловитель

Струйно-фильтрационный золоуловитель (рисунок 1.14) упоминался в базе РИНЦ впервые в 2008 г. [56], по ссылкам на цитируемую литературу идея зародилась в 1986 г., когда и был запатентован способ улавливания пыли в зернистых фильтрах [57]. Сам же пылеуловитель запатентован был позднее, когда с помощью численных и опытных экспериментов началось более полное изучение установки [58], апробация результатов происходила посредством выпуска статей в российских и зарубежных базах [59]. Имеется также упоминание об установке в одном из пособий по математическому моделированию запыленных потоков [60].

Особенностью данной установки, отличающей ее от ранее изученных, является наличие зернистого слоя, сквозь который проходит поток из мелкодисперсной (оставшейся) золы и оседает на материале, из которого он выполнен (навитая на специальный каркас металлическая проволока, уложенная в несколько слоев [61]).

Результаты испытания пылеуловителя с зернистым слоем проходили без регенерации фильтрующего слоя при гидравлическом сопротивлении Δp = 198,2 - 512,3 Па, эффективность очистки от 71,13–98,7 %; с непрерывной регенерацией фильтрующего слоя эффективность находилась в интервале 81,37–99,3 % при Δp = 485,4 Па [60].

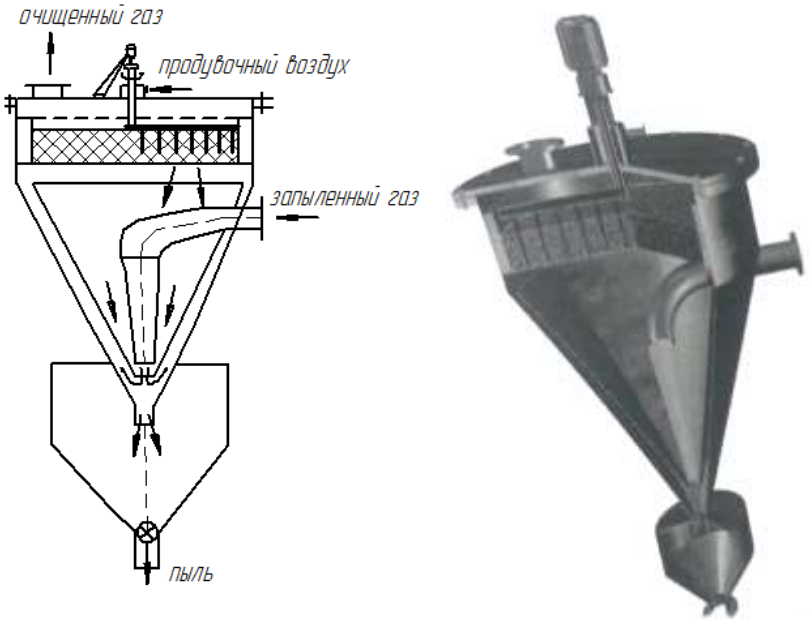


Рисунок 1.14 – Струйно-фильтрационный пылеуловитель

1.3. Инерционно-вакуумный золоуловитель

1.3.1. История создания установки

Инерционно-вакуумный золоуловитель – это аппарат, предназначенный для эффективной золоочистки потока уходящих газов с тепловой электростанции, работающей на твердом топливе.

Принцип работы установки заключается в беспульсационном движении входящего запыленного потока вдоль направляющего аппарата. Далее при развороте его на 180° зола по инерции движется в поворотную камеру и оседает в золовой бункер, а дымовые газы направляются в выходной патрубок. При расчете с помощью численного эксперимента выявлено, что аэродинамическое сопротивление установки – 180 Па, наибольшая скорость, развиваемая в установке, – 27 м/с, эффективность установки достигает 97 % [62]. Разработка установки началась в 2009 г. [63]. На две конструкции имеются патенты, первая установка – 2009 г. [64], вторая установка – 2017 г. [65]. Первый полупромышленный образец был испытан в 2009 г. при участии Э. Х. Досалина и В. А. Корсакова, магистрантов ОмГТУ, в ходе которого были приняты во внимание особенности поведения запыленного потока в антициклоне. Далее при финансовой поддержке ИНТЕР РАО «ЕЭС» из фонда «Энергия без границ» осуществлялось спонсирование хоздоговорной темы № 15001 «Разработка, авторский надзор за монтажом и участие в испытаниях полномасштабного инерционно-вакуумного золоуловителя» и велась разработка ИВЗ второго поколения. Вторая установка выполнена с изменениями относительно первого полупромышленного образца золоуловителя и испытана на АО «ТГК-11» СП «ТЭЦ-4» в г. Омске.

1.3.2. Полупромышленный первый образец ИВЗ

Э. Х. Досалиным и В. А. Корсаковым, магистрантами ОмГТУ, в 2009 г. на основе моделирования процессов, происходящих в инерционно-вакуумном

золоуловителе, а также с учетом экспериментальных исследований, проведенных на лабораторной установке инерционно-вакуумного золоуловителя, был разработан полупромышленный образец (рисунок 1.15).

Рисунок 1.15 – Полупромышленная установка инерционно-вакуумного золоуловителя

Для проведения зависимостей между рабочими параметрами установки, а также их влияния на эффективность очистки газов от твердых частиц было проведено более 400 экспериментов.

Для проведения экспериментов были использованы полупромышленный образец инерционно-вакуумного золоуловителя; дымосос ДН-10 (производительность 20400 м^3/ч) [66]; газоанализатор Testo 335 в комплектации с зондом (Testo AG, Германия); весы аналитические Adventurer Ohaus Pro (точность измерения 0,001 г); микроскоп МПБ-2 (цена деления 50 мК); тягонапоромер ТНМП – 52.

В ходе натурного эксперимента для изменения показателей производительности дымососа использовались жалюзийные решетки и подсосы.

При этом был проведен ряд замеров фракционного состава золы для подтверждения нормативных данных (рисунок 1.16).

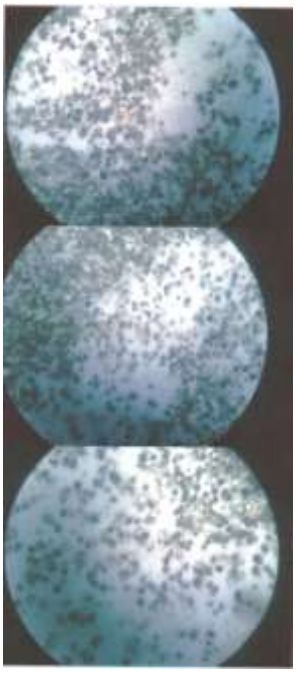


Рисунок 1.16 – Фотографии фракционного состава золы через микросоком, цена деления 50 мкм

В ходе проведения эксперимента ряд параметров менялся, при этом основные данные приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Основные параметры проведения эксперимента

Наименование показателя и технические параметры	Значение
Производительность по очищаемой газовоздушной смеси, тыс. $м^3$/ч	20,4
Массовая концентрация пыли в очищаемом газе на входе, г/$м^3$	1–100
Остаточная запыленность	0,01–1
Аэродинамическое сопротивление, Па	180
Скорость потока, м/с	27
Температура очищаемого газа, ^oC	22
Установленная мощность, кВт на 1 тыс. $м^3$/ч	0,5–0,75
Габаритные размеры: длина, ширина, высота, м	3×2×5
Масса с несущей конструкцией и дымососом, кг	1500

Принцип работы: ИВЗ первого поколения работает под разрежением, следовательно, необходима полная герметизация аппарата, чтобы отсутствовали присосы воздуха. Присосы воздуха увеличат количество дымовых газов, что приведет к изменению сопротивления установки. На рисунке 1.17 представлена схема работы инерционно-вакуумного золоуловителя.

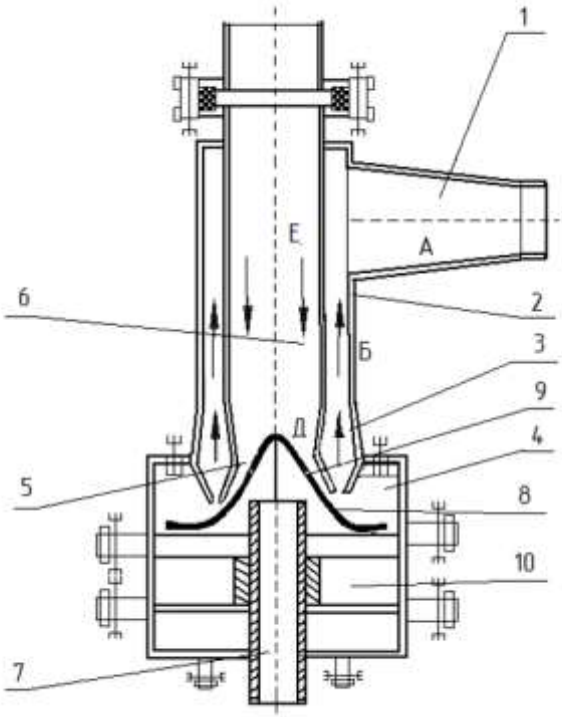


Рисунок 1.17 – Схема работы ИВЗ первого поколения:

1 – выходной канал очищенного газа; *2*, 3 – выходной патрубок;

4 – поворотная камера (ПК); *5* – конфузорный участок; *6* – входной патрубок;

7 – штанга перемещения направляющего аппарата; *8* – рассекатель;

9 – отверстия в рассекателе; *10* – золовый бункер

Загрязненный газ через входной патрубок *6* (рисунок 1.17) по стрелке Е входит в золоуловитель, далее движется по аэроканалу и выходит из разгонного сопла *5*. Струя газа после разгонного сопла разворачиваются по стрелке *Б*. При движении газового потока по объему поворотной камеры *4*, он контактирует с направляющим аппаратом, под которым газ относительно неподвижен. Частицы из скоростного потока переходят в этот объем и осаждаются в бункер. Но осаждаются не все частицы. Часть их идет на выход из аппарата и здесь, попадая под влияние входной струи, вновь направляется в поворотную камеру *4* золоуловителя. Получается аэродинамическая ловушка – частицы имеют возможность попасть в поворотную камеру аппарата, но не могут выйти из нее и, в конце концов, полностью осаждаются в бункере. Таким образом, частицы могут войти в канал, а выйти – нет.

Рассекатель 8 представляет собой обтекаемую выпуклую полую пирамиду с открытым дном. В верхней части рассекателя 8 просверлены четыре отверстия 9. Через них газы под рассекателем 8 подсасываются в зону высоких скоростей, располагающуюся над рассекателем.

При стабилизации рабочего цикла очистка газа производится с эффективностью очистки до 97 %. При содержании в отходящих газах частиц с преобладающим количеством фракционного состава от 0,1 до 5 мкм технологическая схема очистки включает в себя градиентный сепаратор и каскад инерционно-вакуумных золоуловителей, установленных последовательно (рисунок 1.18).

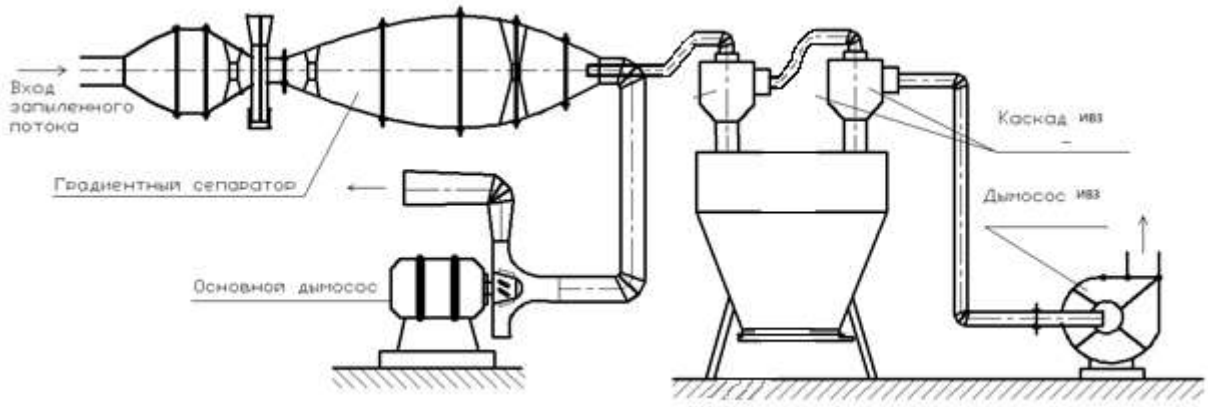


Рисунок 1.18 – Типовая технологическая схема для очистки газов от взвешенных частиц с фракционным составом менее 5 мкм со степенью очистки до 97 %

1.3.3. Обработка зависимостей эффективности пылеулавливания

В ходе эксперимента были определены влияние разрежения на степень улавливания золы в пылевом бункере инерционно-вакуумного золоуловителя. Для этого были необходимы приборы, с помощью которых будут получены значения разрежения: тягонапоромер ТНМП – 52, газоанализатор Testo 335 в комплектации с зондом (Testo AG, Германия).

Замеры массы частиц до и после ИВЗ производились на аналитических весах Adventurer Ohaus Pro (точность измерения 0,001 г).

В ходе опытов было установлено, что параметры разрежения в верхней

и нижней частях бункера инерционно-вакуумного золоуловителя совпадают, что аналогично процессу моделирования, произведенного с помощью ANSYS CFX [67].

Кроме того, еще одним параметром является положение направляющего аппарата, его положение можно регулировать на 22 оборота червячного редуктора. Один оборот составляет 20 мм изменения высоты направляющего аппарата.

Замеры производились в выходном канале золоуловителя при максимальных параметрах расхода, обеспечиваемых дымососом ДН-10 (20400 м^3/ч). Целесообразен анализ данных при максимальном расходе в виду промышленного назначения оборудования, где объем очищаемых газов измеряется в десятках и сотнях тысяч м^3/ч.

Было проведено более 400 опытов [68, 69, 70] при различных параметрах (положение направляющего аппарата, расход), после чего данные были обработаны и рассчитаны среднестатистические показатели, приведенные в таблице 1.5. Первоначально в ИВЗ устанавливается атмосферное давление в 101 кПа, в процессе работы указана разница в разрежении от первоначального давления.

Таблица 1.5 – Экспериментальные показатели разрежения в бункере ИВЗ

№ поворота червячного редуктора	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Создаваемое разрежение (кПа)	-16,1	-12,9	-10,7	-9,1	-8	-7,2	-6,6	-6,1	-5,7
№ поворота червячного редуктора	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Создаваемое разрежение (кПа)	-5,4	-5,4	-5,3	-4,8	-4,7	-4,4	-4,4	-4,3	-4,1
№ поворота червячного	19	20	21	22	23				

редуктора					
Создаваемое разрежение (кПа)	-4,1	-4	-3,9	-3,8	-3,7

Основываясь на данных таблиц, можно построить график (рисунок 1.19).

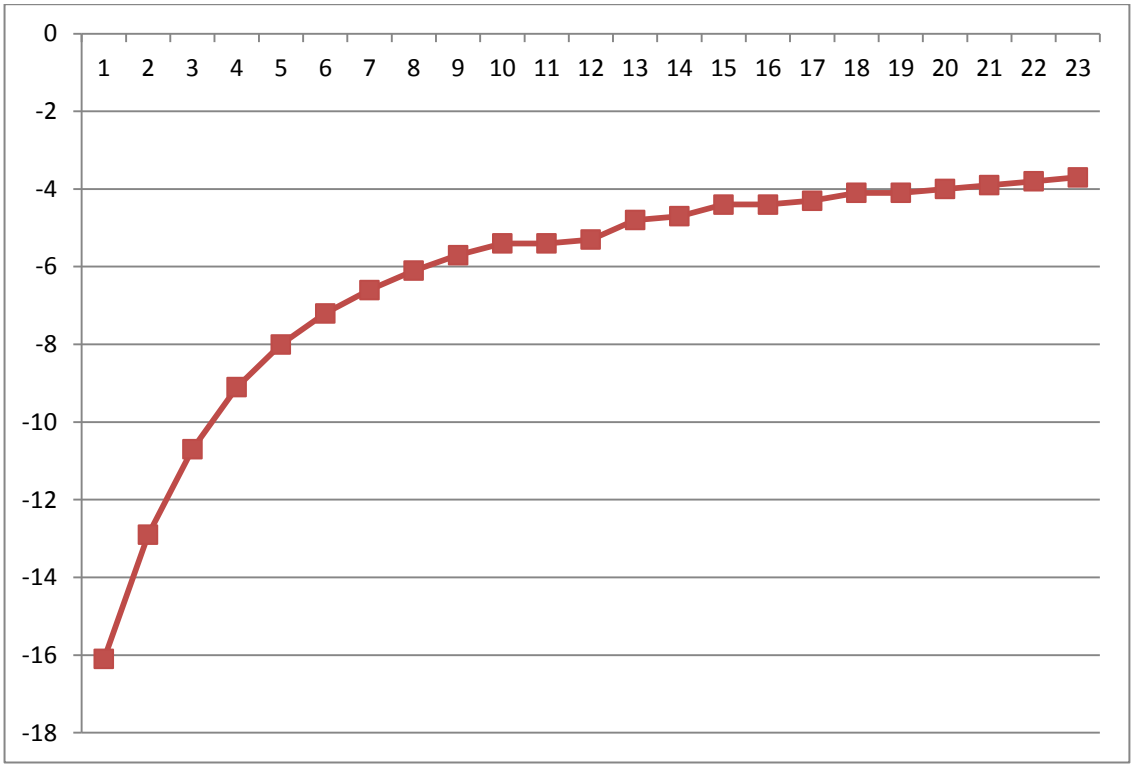


Рисунок 1.19 – Зависимость разрежения в бункере инерционно-вакуумного золоуловителя от положения рассекателя (кПа, количество оборотов)

Из графика (рисунок 1.19) видно, что по мере опускания рассекателя, т. е. увеличения расстояния между деталями входного канала и самим рассекателем, разрежение уменьшается. При этом при определенных параметрах наступает относительная стабилизация разрежения, что особо видно на участке от 15 до 23 поворота.

После замеров разрежения было проведено более 200 экспериментов по установлению зависимости между разрежением в бункере ИВЗ, рассекателя и эффективностью улавливания золы.

Таблица 1.3.3.4 – Эффективность улавливания ИВЗ в зависимость от разрежения в бункере и положения направляющего аппарата

№ поворота червячного редуктора	1	1,5	2	2,5	3
Эффективность улавливания, % (Натурный эксперимент)	80,2	85,4	87,1	88	87,5
Эффективность улавливания, % (численный эксперимент)	80	86	87	90	85
Создаваемое разрежение (кПа)	-16,1	-14	-12,9	-11	-10,7

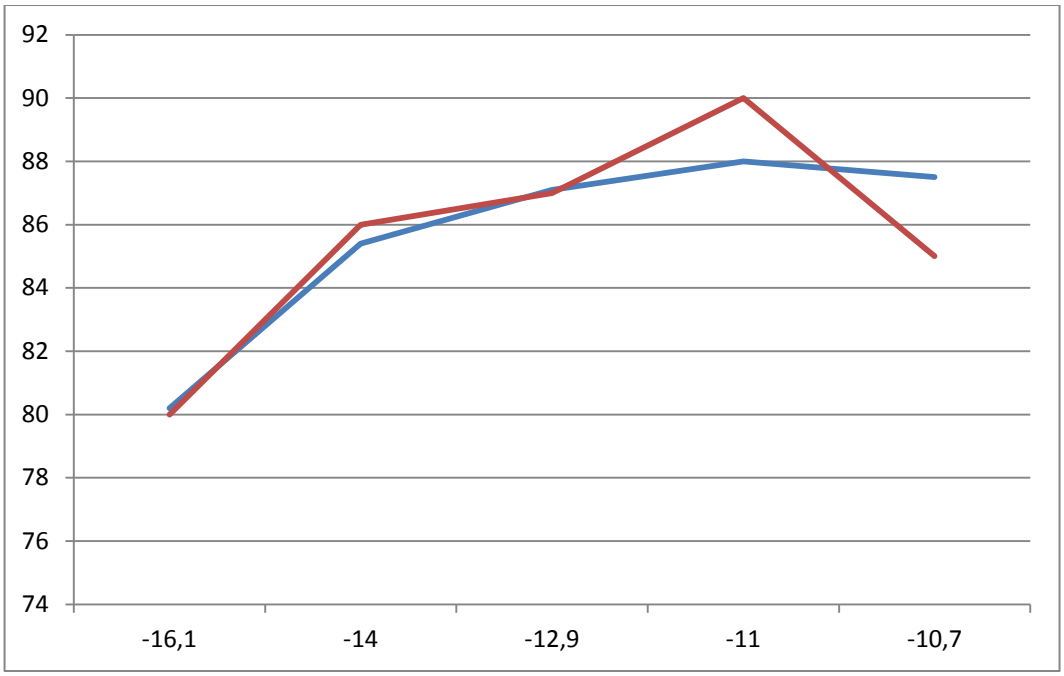


Рисунок 1.20 – Зависимость разрежения в бункере ИВЗ, положения рассекателя и степени эффективности улавливания золы (красная линия – численный эксперимент, синяя линия – натурный эксперимент)

Основываясь на данных таблицы и графика, можно сделать вывод о низкой эффективности работы оборудования в ее начальном положении, при этом стоит отметить, что незначительный рост степени эффективности обусловлен измене-

нием двух параметров разрежения в пылевом бункере и положением рассекателя. При этом скачок в разрежении на 3,2 кПа в переходе от первого до второго положения рассекателя является основополагающим в виду того, что последующее изменение шага рассекателя и изменение разрежения в бункере ИВЗ в среднем на 1кПа не дают скачка эффективности более, чем на 3 % (в данном случае – 7 %), рисунок 1.21.

Таблица 1.6 – Эффективность улавливания ИВЗ в зависимости от разрежения в бункере и положения направляющего аппарата

№ поворота червячного редуктора	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
Эффективность улавливания, % (натурный эксперимент)	85	90,75	91,1	89,95	92,3	92	94,6	96	98,9
Эффективность улавливания, % (численный эксперимент)	83	89	90	90	93	91	95	95	97
Создаваемое разрежение (кПа)	-8	-7,9	-7,2	-7	-6,6	-6,4	-6,1	-6	-5,7

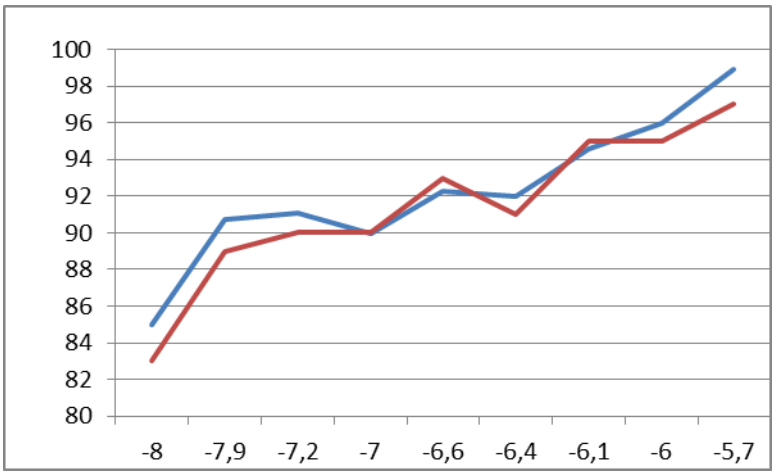


Рисунок 1.21 – Зависимость разрежения в бункере ИВЗ, положения направляющего аппарата и степени эффективности улавливания золы

Среднее положение рассекателя при умеренном изменении разрежения

с каждым шагом обеспечивают наиболее стабильные результаты. Степень эффективности с небольшими колебаниями стабилизируется на 9 обороте при разрежении в 5,7 кПа и обеспечивает эффективность установки около 98–99 % (рисунок 1.22).

Таблица 1.7 – Эффективность улавливания ИВЗ в зависимости от разрежения в бункере и положения направляющего аппарата

№ поворота червячного редуктора	21	21,5	22	22,5	23
Эффективность улавливания, % (натурный эксперимент)	87,5	93	92,5	95,2	98,5
Эффективность улавливания, % (численный эксперимент)	88	94	91	94	97
Создаваемое разрежение (кПа)	-3,9	-3,9	-3,8	-3,8	-3,7

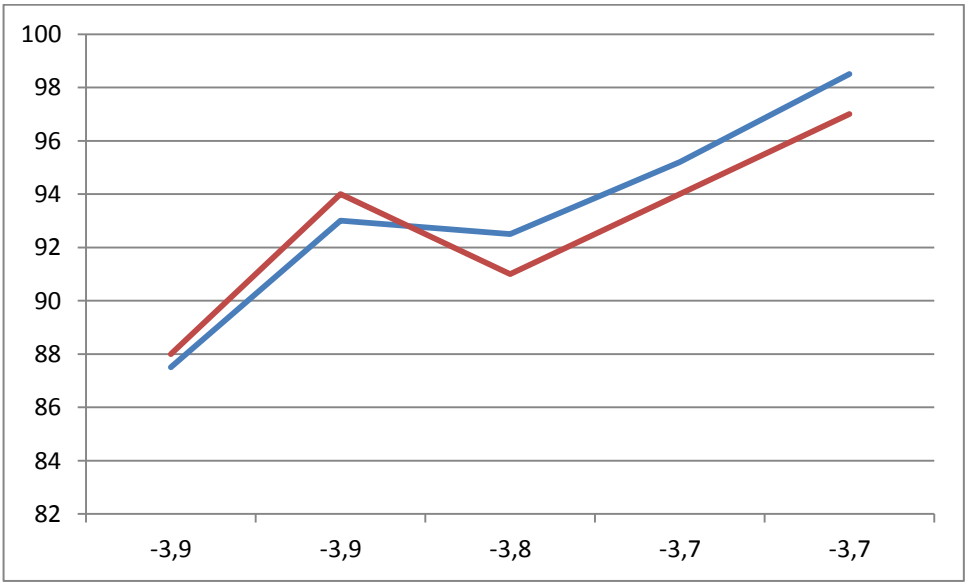


Рисунок 1.22 – Зависимость разрежения в бункере ИВЗ, положения направляющего аппарата и степени эффективности улавливания золы

Резкий рост степени эффективности при переходе от 21 до 23 оборота при

незначительном изменении разрежения в бункере ИВЗ с каждым шагом (0,1 кПа) обусловлен геометрическими особенностями установки. Стоит отметить, что стабилизация процесса и высокие эффективности достигаются при крайнем верхнем положении рассекателя и разрежении в бункере 3,7 кПа.

Таким образом, найдены наиболее оптимальные участки и разрежения в пылевом бункере ИВЗ:

- 9-й оборот червячного редуктора при разрежении в 5,7 кПа (180 мм от начального положения рассекателя);
- 23-й оборот червячного редуктора при разрежении в 3,7 кПа (460 мм от начального положения рассекателя).

В то же время при увеличении разрежения или изменении положения рассекателя происходит турбулизация потока, что приводит к уносу твердых частиц из установки. С другой стороны, немаловажным фактором является изменение скоростных параметров аппарата, моделирование которых уже осуществлено с помощью ANSYS CFX. Выявлены оптимальные параметры и зависимости, что обусловливает продолжение исследований с золоуловителем.

Красными линиями отмечены результаты численного эксперимента, которые были получены при помощи ANSYS CFX на 3D-модели полупромышленного образца ИВЗ. Тем самым проведена верификация по установке, представленная в главе 3.1. В связи с этим дальнейшие исследования были направлены на стабилизацию потоков за счет изменения геометрии входных и выходных каналов, что должно обеспечить аналогичную эффективность на более мелкодисперсных взвесях, чем зола (цемент, асбест, сажа), [67].

Выводы к главе 1

1. Инерционные золоуловители по отношению к другим аппаратам обладают рядом достоинств: отсутствием затрат на подготовку воды, дополнительного расхода на электроэнергию; повышенной эксплуатационной надежностью; компактностью; относительно невысоким аэродинамическим сопротивление устройства. В связи с этим было принято разрабатывать аппарат именно такого типа. Им является ИВЗ первого поколения, представленный в § 1.3. Он был создан в виде полупромышленного образца и на нем в 2009 г. были проведены натурные эксперименты для определения его степени улавливания. Установка зарекомендовала себя положительно, в рамках диапазона улавливаемых частиц (5–40 мкм): высокая эффективность улавливания и сопротивление установки.
2. В 2015 г. была заключена хоздоговорная тема № 15001 с АО «ВТИ», в рамках которой было необходимо создать золоуловитель под габариты, занимаемые циклоном на СП «ТЭЦ-4» АО «ТГК-11» Омской области. Проект полупромышленного образца ИВЗ был доработан и исследован для определения основных характеристик золоулавливающего аппарата. В последующих главах подробно описан порядок разработки ИВЗ второго поколения. Таким образом, задачи исследования можно сформулировать следующим образом:
    1) создать конструкцию ИВЗ второго поколения, которая выдержала бы поставленные заказчиком условия (сопротивление, эффективность улавливания, дисперсный состав частиц, расход дымовых газов);
    2) провести промышленный эксперимент с обеспечением комплекса измерений фактических рабочих параметров золоуловителя;
    3) верифицировать алгоритм численного эксперимента ИВЗ с полученными данными промышленного эксперимента;
    4) разработать мероприятия и рекомендации по повышению эффективности улавливания работы ИВЗ.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ ЗАПЫЛЕННЫХ ПОТОКОВ

2.1. Разработка математической модели и процесса движения запыленного потока

Настоящее время характеризуется широким внедрением во все передовые отрасли науки и промышленности прикладных программных пакетов вычислительной гидрогазодинамики и теплофизики как неотъемлемой части комплекса CAD-CAE [71] информационных технологий и исследовательского инструментария. Применение этих программ при проектировании образцов новой техники позволяет резко снизить затраты и сократить сроки создания новых изделий. Мировой рынок программ вычислительной гидрогазодинамики [72] и теплофизики, представленный такими пакетами, как Fluent, Ansys-CFX, Star-CD, CFD-ACE[73] и рядом других [74, 75, 76, 77] превышает в годовом исчислении 300 млн. долларов и возрастает ежегодно почти на 20 %. Параллельно в передовых странах на базе университетов и исследовательских центров развиваются и создаются программы вычислительной гидрогазодинамики, не имеющие столь широкого охвата прикладных задач, как коммерческие программы, но позволяющие разрабатывать и апробировать новые физические модели и математические алгоритмы, а также отрабатывать методики расчета течений с акцентом на наиболее адекватное воспроизведение данных экспериментов. Несомненно, что именно сочетание коммерческих и развитых университетских программных продуктов позволяет эффективно использовать достижения вычислительной гидрогазодинамики и осуществлять профессиональную подготовку специалистов, столь необходимых сегодня для промышленности, научных и образовательных учреждений [16].

Для проведения численного эксперимента необходимо задаться математической моделью решения задачи [78] и отметить ряд особенностей газовой среды и ее полидисперсной составляющей.

В ходе расчета необходимо принять ряд условий:

1) класс дисперсных потоков рассматривается как двухкомпонентная механическая смесь, в которой отсутствуют фазовые переходы, истирание и дробление частиц;
2) потоки рассматриваются во всем диапазоне концентраций (вплоть до определенной ее величины – плотный движущийся слой);
3) в пределах элементарной ячейки дисперсный поток рассматривается как осредненный [79];
4) дисперсные частицы рассматриваются сферическими [80], в любом ином случае необходимо задавать уравнением форму частицы. Исходя из того, что зольная частица в ходе своего аэродинамического перемещения действительно приобретает округлую форму, этим условием можно пренебречь и считать частицу идеально круглой.

Для модернизации полупромышленного образца ИВЗ и испытаний в наиболее оптимальных режимах работы необходимо было провести численные исследования течения запыленного потока в канале ИВЗ первого поколения. В гидрогазодинамике эти исследования опираются на использование системы уравнений Навье-Стокса при решении их методом контрольных объемов и реализуются в программе ANSYS CFX. В ходе моделирования процесса используется k-ε модель [81]. Математическая модель [82] течения среды имеет следующий вид:

уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho U_j\right) = 0; \tag{2.1}$$

уравнения движения:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho U_i U_j\right) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{eff}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\right] + S_{M,} \tag{2.2}$$

где S_M является суммарной силой, действующей на тело, μ_{eff} является эффективной вязкостью, рассчитываемой в зависимости от турбулентности;

p' – это измененное давление;

μ_t – турбулентная вязкость k-ε модели, учитывающая взаимосвязь турбулентной вязкости с турбулентной кинетической энергией и диссипацией по уравнению:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t. \tag{2.3}$$

В k-ε модели, как и в алгебраическом уравнении модели в ANSYS CFX, используется турбулентная эффективная вязкость, рассчитываемая вот таким образом:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{2.4}$$

где C_μ – константа. Эталонное ее значение равняется 0,09.

Значения k и ε вычисляются напрямую из дифференциального уравнения движения для определения турбулентной кинетической энергии и турбулентной диссипации:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k - \rho\varepsilon + P_{kb}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}P_k - C_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon + C_{\varepsilon 1}P_{kb}), \tag{2.5}$$

где $C_{\varepsilon 1}$ (1,44), $C_{\varepsilon 2}$ (1,92), σ_κ (1,0), и σ_ε (1,3) – постоянные.

P_{kb} и $P_{\varepsilon b}$ представляют собой влияние выталкивающей силы. P_k является производством турбулентности из-за сил внутреннего трения, которые моделируются по уравнению:

$$P_k = \mu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3}\frac{\partial U_k}{\partial x_k}\left(3\mu_t\frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k\right) \tag{2.6}$$

Для несжимаемых потоков $\frac{\partial U_k}{\partial x_k}$ малый, является вторым членом уравнения (2.6) и не несет значительного вклада в производство турбулентности. Для сжимаемых потоков $\frac{\partial U_k}{\partial x_k}$ очень большой в регионах с высокими скоростными отклонениями (пример: возникновение гидравлического удара).

Член $3\mu_t$ основан на остаточном межмолекулярном напряжении. В уравнении (2.6) предотвращает увеличение значений k и ε, однако решение может стать некорректным, если сетка выполнена несоответствующим образом.

Чтобы избежать накопления турбулентной кинетической энергии в областях застоя, имеются два ограничителя производства кинетической энергии (P_k).

Члены уравнения движения и алгебраического скольжения могут быть объединены, что значит, что сочетание двух составляющих может присутствовать при расчете непрерывной фазы. По крайней мере, один член должен быть установлен в Constraint. Для любых дисперсных фаз выбирается опция “Algebraic Slip”, так как частица сопротивляется движению потока, перемещается в пространстве с меньшей, чем у потока скоростью.

Опция “Algebraic Slip” может быть установлена на “Drag Force Balance” или “Slip Velocity”. Drag Force Balance замыкает соотношение для скорости скольжения.

$$\left|u_{S_\alpha}\right| u_{S_\alpha}{}^{i} = \frac{4}{3}\frac{d_p}{\rho_c C_D}(\rho_\alpha - \rho_m)\left(\frac{\partial u_m^i}{\partial t} - u_m^j \frac{\partial u_m^i}{\partial x^j} - g^i\right), \tag{2.7}$$

где индекс m относится к объемному количеству несущей фазы, а α относится к свойству дисперсной фазы. Коэффициент сопротивления C_D может быть определен по модели Schiller Naumann.

Межфазный перенос через источниковые члены

Точно так же, как жидкость влияет на поведение частицы посредством сил и, например, конвективного теплообмена, существует противодействующее влияние частицы на жидкость. Этот эффект называется связью между фазами. Если несущей среде разрешено влиять на траектории частиц, но сами частицы не оказывают влияния на жидкость, то взаимодействие называется односторонним One way Coupling. Если частицы влияют на характер течения несущей среды, то взаимодействие называется двусторонним Fully Coupled.

Прогноз движения двухфазного потока в односторонне связанных системах One way Coupling относительно прост. Поле потока жидкости может быть рассчитано независимо от траекторий частиц. Односторонняя связь One way Coupling может

быть приемлемым приближением в потоках с низкими дисперсными фазовыми нагрузками, где частицы оказывают незначительное влияние на поток жидкости.

Двусторонняя связь Fully Coupled требует, чтобы члены источника частиц были включены в уравнения импульса жидкости. Источниками импульса могут быть турбулентные дисперсионные силы или сопротивление, которые вследствие приводят к завихрениям несущий поток. Термины источника частиц генерируются для каждой частицы, когда они отслеживаются в потоке. Источники частиц применяются в контрольном объеме, в котором находится частица в течение временного шага.

Источники частиц в уравнениях движения несущей среды получают путем решения транспортных уравнений для источников. Общее уравнение для источников частиц:

$$\frac{dS_P}{dt} = C_S\phi_P + R_S, \tag{2.8}$$

где $C_S\phi_P$ – это влияние частиц, которые являются линейными в переменной решения, а R_S содержит все иные влияния, в том числе когда это необходимо для массопередачи $-(dm_p/dt)\ \phi_P$.

Источник S добавляется к непрерывной среде, затем умножается на количественный расход для этой частицы, который представляет собой массовый расход, деленный на массу частицы.

В CFX члены источника частиц пересчитываются каждый раз, когда частицы вводятся. Затем исходные члены сохраняются в памяти для того, чтобы они могли применяться каждый раз, когда вычисляются коэффициенты жидкости. Таким образом, источники частиц могут быть применены, даже если частицы не были введены в текущий расчет потока.

Многофазный поток, содержащий дисперсные частицы, может быть смоделирован с использованием либо модели переноса частиц, либо многофазной модели Эйлера-Эйлера. В диссертации использована модель Эйлера-Лангранжа.

Смещение частицы рассчитывается с использованием прямого интегрирования Эйлера скорости частицы по временному шагу, δt.

Таким образом, $\left(dx_p/dt\right) = U_p$, перемещение частицы записывается как:

$$x_p^n = x_p^o + U_p^o \delta t, \tag{2.9}$$

где индексы *o* и *n* относятся к старым и новым значениям, а *Up* является начальной скоростью частицы. При прямом интегрировании скорость частиц, рассчитанная в начале временного шага, предполагается преобладающей на всем шаге. В конце временного шага скорость новой частицы вычисляется с использованием аналитического решения уравнения импульса частицы (2.9).

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = F_{all} \tag{2.10}$$

F_{all} – сумма всех сил, действующих на частицу. Это уравнение (2.10) – пример основного уравнения движения потока.

Аналитическое решение приведенного выше общего уравнения переноса можно записать в виде:

$$\phi_p = \phi_f + \left(\phi_p^o - \phi_f\right)\exp\left(-\frac{\delta t}{\tau}\right) + \tau R\left(1 - \exp\left(-\frac{\delta t}{\tau}\right)\right), \tag{2.11}$$

где ϕ – универсальной транспортной переменной, индекс f указывает значение переменной в несущей жидкости, τ – коэффициент линеаризации и R – основной нелинейный источник.

Свойства жидкости взяты от начального временного шага.

При расчете сил и значений для τ и R много переменных жидкости влияет на результат: такие как плотность, вязкость и необходимая скорость в определенном положении частицы. Эти переменные всегда получаются точно путем вычисления элемента, в котором движется частица вычисления вычислительной позиции в элементе и использования базовых функций формы алгоритма дискретизации для интерполяции от вершин к позиции частицы.

Влияние турбулентности на траектории частицы

Расчет мгновенной скорости жидкости v_f зависит от режима потока и желаемого типа отслеживания частиц (основное или с турбулентной дисперсией). В ламинарных потоках или в потоках, где рассчитывается среднее отслеживание частиц, v_f равна средней локальной скорости жидкости $\overline{v}_f$, окружающей частицу. Путь частицы является детерминированным (то есть существует уникальный путь для частицы, впрыскиваемой в определенное место в потоке).

При турбулентном движении мгновенная скорость жидкости разлагается на среднее значение $\overline{v}_f$ и флуктурируемое v_f. Теперь траектории частицы не являются детерминированными, и две одинаковые частицы, инжектируемые из одной точки в разное время, могут следовать по отдельным траекториям из-за случайного характера мгновенной скорости жидкости. Это флуктуирующая составляющая скорости жидкости, которая вызывает дисперсию частиц в турбулентном потоке.

Используемая модель турбулентного рассеяния частиц, которая принадлежит Госману и Иоанниду, предполагает, что частица всегда находится в одном турбулентном вихре. У каждого вихря есть характерная колеблющаяся мгновенная скорость v_f', время витания τ_e, и длина траектории l_e. Когда частица входит в вихрь, флуктуирующая скорость для этого вихря добавляется к локальной средней скорости жидкости, чтобы получить мгновенную скорость жидкости. Скорость турбулентной жидкости v_f' предполагается преобладающей, пока время взаимодействия частицы с вихрем меньше, чем время жизни вихря, а смещение частицы относительно вихря меньше, чем длина вихря. Если любое из этих условий нарушено, предполагается, что частица входит в новый вихрь с новой характеристикой v_f', τ_e и l_e.

Скорость турбулентности, завихрение, длина и время витания рассчитываются на основе свойств локальной турбулентности потока:

$$v_f' = \Gamma(2k/3)^{0,5}, \tag{2.12}$$

$$l_e = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon}, \tag{2.13}$$

$$\tau_e = \frac{l_e}{\left(\frac{2k}{3}\right)^{\frac{1}{2}}}, \tag{2.14}$$

где k и ε являются локальными турбулентными кинетической энергией и диссипацией;

C_μ – константа турбулентности. Член $C_\mu^{3/4}$ был выбран, чтобы связать характерную шкалу длины с длиной вихревого рассеяния. Переменная Г – это нормально распределенное случайное число, которое учитывает случайность развития турбулентности относительно среднего значения. Из-за этой случайности каждый компонент колеблющейся скорости *(u',v',w')* может иметь различное значение в каждом вихре.

Межфазное перемещение частицы пыли относительно элемента потока

Для сферических частиц коэффициент $c_{\alpha\beta}^{(d)}$ может быть получен аналитически. Площадь отдельной частицы A_p проецируется в направлении потока, и объемы одной частицы V_p применяются в:

$$A_p = \frac{\pi d^2}{4}, \tag{2.15}$$

$$V_p = \frac{\pi d^3}{6}, \tag{2.16}$$

где d – основной диаметр. Количество частиц на единицу объема n_p рассчитывается по:

$$n_p = \frac{r_\beta}{V_p} = \frac{6}{\pi}\frac{r_\beta}{d^3}, \tag{2.17}$$

где r_β – объем минимальной фракции частиц.

Сопротивление одной частицы по отношению к непрерывной фазе:

$$D_P = \frac{1}{2} C_D \rho_\alpha A_P \left|U_\beta - U_\alpha\right| \left(U_\beta - U_\alpha\right), \tag{2.18}$$

где U_β – скорость частицы;

U_α – скорость несущего потока.

Следовательно, общее сопротивление на единицу объема в потоке жидкости составляет:

$$D_{\alpha\beta} = n_p D_P = \frac{3}{4}\frac{C_D}{d}\rho_\alpha r_\beta \left|U_\beta - U_\alpha\right|\left(U_\beta - U_\alpha\right). \quad (2.19)$$

Сравнение с уравнениями импульса для фазы α, где сила сопротивления на единицу объема:

$$D_{\alpha\beta} = c_{\alpha\beta}^{(d)}\left(U_\beta - U_\alpha\right), \quad (2.20)$$

где:

$$c_{\alpha\beta}^{(d)} = \frac{3}{4}\frac{C_D}{d} r_\beta \rho_\alpha \left|U_\beta - U_\alpha\right| \quad (2.21)$$

может быть записана как:

$$c_{\alpha\beta}^{(d)} = \frac{3}{4}\frac{C_D}{8} A_a \rho_\alpha \left|U_\beta - U_\alpha\right|. \quad (2.22)$$

В Schiller Naumann модели сопротивления применяется C_D, рассчитываемое по формуле:

$$C_D = \frac{24}{Re}\left(1 + 0{,}15 Re^{0{,}687}\right), \quad (2.23)$$

где Re – число Рейнольдса.

CFX вносит корректировки в (2.23), чтобы обеспечить корректное сопротивление дисперсной фазы относительно несущей среды в инерционном режиме, принимая:

$$C_D = \max\left(\frac{24}{Re}\left(1 + 0{,}15 Re^{0{,}687}\right), 0{,}44\right) \quad (2.24)$$

Турбулентная дисперсия

Если дисперсия турбулентных частиц включена, то нужно будет отслеживать гораздо большее число частиц (обычно на порядок выше), поскольку используется стохастический (вероятностный) метод. Это значительно увеличит время вычислений; следовательно, чаще всего выполняется как пост-процесс, когда существует только одна итерация частиц.

Если турбулентная дисперсия используется в итеративной ситуации, может оказаться невозможным достичь полной сходимости из-за стохастической приро-

ды источников по отношению к непрерывной фазе, хотя генератор случайных чисел, используемый при определении вихрей, сбрасывается на каждой итерации частицы.

Уравнение движения частицы

Рассмотрим отдельную твердую частицу, движущуюся в сплошной несущей среде. Силы, действующие на частицу, которые влияют на ее ускорение, обусловлены разницей в скорости между частицей и жидкостью, а также смещением жидкости частицей. Уравнение движения для такой частицы было получено Бассетом, Буссинеском и Осином для вращающейся системы отсчета:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = F_D + F_B + F_R + F_{VM} + F_P + F_{BA}, \tag{2.25}$$

которое имеет следующие силы по правую сторону:

F_D – сила сопротивления, действующая на частицу;

F_B – выталкивающая сила;

F_R – силы, возникающие из-за вращения потока (центростремительные силы и силы Кориолиса);

F_{VM} – виртуальная (или добавленная) массовая сила. Это сила для ускорения виртуальной массы жидкости в объеме, занимаемом частицей. Этот термин важен, когда смещенная масса жидкости превышает массу частицы, например, при движении пузырьков;

F_P – сила градиента давления. Это сила, приложенная к частице из-за градиента давления в жидкости, окружающей частицу, вызванной ускорением жидкости. Это имеет значение только тогда, когда плотность жидкости сопоставима или превышает плотность частиц (движение кипящей жидкости с пузырьками);

F_{BA} – сила Бассэ – исторический термин, который объясняет отклонение в модели потока от установившегося состояния. Этот термин не реализован в CFX [85].

Силы сопротивления для частицы

Аэродинамическая сила сопротивления частицы пропорциональна скорости скольжения, U_S, между частицей и скоростью жидкости:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_F A_F |U_S| U_S = \frac{1}{2} C_D \rho_F A_F |U_F - U_P| (U_F - U_P), \quad (2.26)$$

где C_D – коэффициент сопротивления и A_F – эффективное сечение частицы. Коэффициент сопротивления C_D, введен для учета экспериментальных результатов по вязкому сопротивлению твердой сферы. Коэффициент рассчитывается так же, как и для Эйлерово-Эйлерова многофазного потока.

Силы, действующие на частицу

Несколько различных сил влияют на движение частицы в несущей среде. В ANSYS CFX силы, включенные в уравнение движения частиц в ИВЗ, представляют собой силу аэродинамического сопротивления и силу тяжести.

Сила тяжести, действующая на частицу

Сила тяжести – это гравитационная сила, действующая на частицу, находящуюся в несущей среде. Сила тяжести определяется как

$$F_B = (m_P - m_F) g = m_P \left(1 - \frac{\rho_F}{\rho_P}\right) g = \frac{\pi}{6} d_P^3 (\rho_P - \rho_F) g\,, \quad (2.27)$$

где g – ускорение свободного падения.

Сила турбулентной дисперсии

Турбулентные дисперсионные силы приводят к дополнительному диспергированию частиц из областей с большой объемной долей в области с низкой объемной долей частиц вследствие турбулентных колебаний. Модель дисперсии частиц доступна для учета турбулентной дисперсионной силы. Эта сила важна только для расчета движения мелких частиц (приблизительно меньше 100 мкм для капель воды в воздухе) и когда необходимо увидеть дисперсию.

Сила турбулентной дисперсии активна только в тех регионах, где коэффициент

турбулентной вязкости μ_t выше значения, указанного в пределе коэффициента вязкости по вихреобразованию. Значение по умолчанию 5.

Градиент давления

Сила градиента давления мала для частиц гораздо более высокой плотности, чем несущая жидкость, и в этом случае нет необходимости ее подключать для расчета.

Сила градиента давления является результатом локального градиента давления жидкости вокруг частицы и определяется как:

$$F_P = -\frac{m_F}{\rho_F}\nabla p \tag{2.28}$$

Эта сила важна только в том случае, если существуют большие градиенты давления жидкости и если плотность частиц меньше или равна плотности жидкости. Пренебрегая членами диффузии и источника в уравнении импульса стационарного состояния, градиент давления может быть заменен градиентом скорости. Предполагая постоянную плотность жидкости, силу градиента давления можно записать как

$$F_P = m_F(U_F\nabla U_F - R_F) = m_P\frac{\rho_F}{\rho_P}(U_F\nabla U_F - R_F). \tag{2.29}$$

При этом для более точного представления процессов моделирования необходимо обратиться к классической механике жидкости и газа. В отличие от идеальной жидкости [83], поверхностные силы в общем случае направлены не по нормали к поверхности, а под углом. Это обусловливает методику и подход к решению задач движения потока и дисперсных частиц [84], находящихся в нем.

Движение частиц, обладающих индивидуальными свойствами, рассчитывается при помощи нестационарных дифференциальных уравнений, которые включают в себя уравнения положения, скорости и массы.

2.2. ANSYS как средство замыкания и решения математической постановки задачи

ANSYS – универсальный программный МКО анализа, существующий и развивающийся на протяжении последних 30 лет, является довольно популярным у специалистов в области компьютерного инжиниринга (CAE, Computer-Aided Engineering) [86] и КО-решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, акустики, электродинамики, а также механики связанных полей [87].

Работа в нем ведется по принципу рисунка 2.1

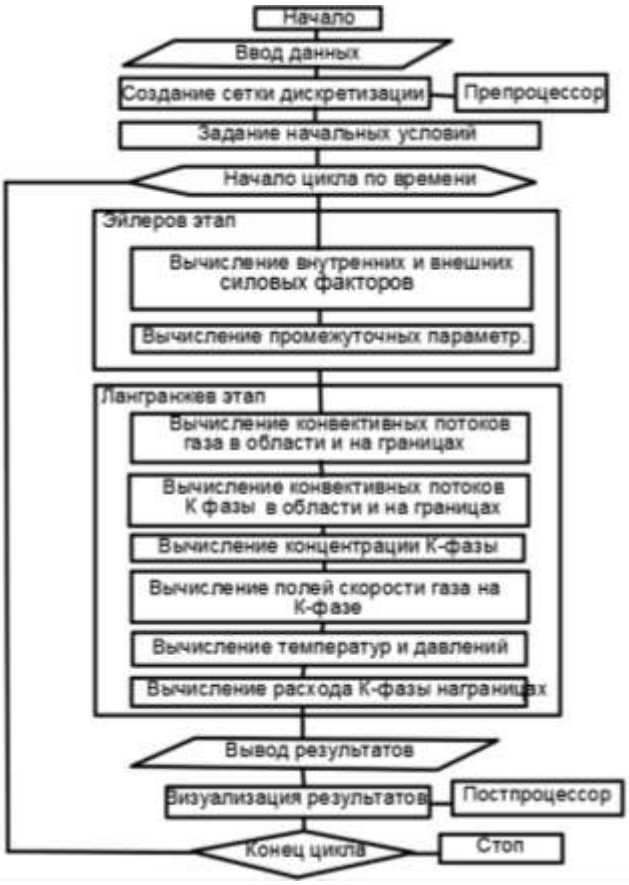


Рисунок 2.1 – Алгоритм численного эксперимента на основе математической модели

2.2.1. Метод контрольных объемов. Meshing

Для того чтобы работать с 3D-моделью, ее удобно изобразить в программном комплексе САПР – Solidworks. Для этого в модуль Geometry на рабочее поле Workbench импортируется созданная ранее модель. С помощью функций Sketching (рисование) и Rectangle (прямоугольник) очерчиваем плоскость, которую будем вытягивать Extrude (удлинение) вдоль модели. А Enclosure (ограждение/разделение) позволит отделить объем, через который будет проходить поток от самой установки и от внешней атмосферы, которая непроизвольно вошла в вытянутую область.

Чтобы модуль Setup (загрузка данных) смог принять модель потока, необходимо преобразовать объем проточной части установки в сетку определенной формы элементов. Physics preference позволяет Workbench преобразовать сетку, основываясь на дальнейшем выборе Solver Preference (выбор программы), например во Fluent, CFX или POLYFLOW. Функция Relevance выставляется равной 0, для относительно быстрого и точного расчета, при увеличении этого показателя происходит уменьшение сетки, особенно в местах стыков и поворотов по всей модели.

Далее рассматривается раздел sizing (отвечающий за укрупнение/уменьшение ячеек сетки) Use Advanced Size Function представляет собой повышенный контроль за функцией размера сетки. Под контролем могут быть рассмотрены следующие параметры:

- углы между нормалями соседних элементов сетки (curvature);
- количество элементов сетки в промежутке между двумя геометрическими плоскостями (proximity);
- градация между минимальным и максимальным размерами, основанная на переходе от одного к другому (относится к любому выбранному методу расчета).

Для того чтобы создать корректную сетку, необходимо выбрать on: Curvature and Proximity в разделе Use Advanced Size Function с учетом всех ранее описанных условий качества расчета.

Пункты Relevance и Relevance center взаимосвязаны; автоматически программа выставляет значение Coarse (грубый расчет, т. к. Relevance = 0 на слайдере), исходя из Physics Preference: CFD.

Initial Size Seed можем выбрать Active или Full Assembly, т. к. в процессе создания сетки не будем убирать ни один сектор нашей конструкции. Проставляется Active Assembly. Все части конструкции будут входить в активную часть расчета.

Smoothing – функция сглаживания и одновременно улучшения качества элемента сетки путем добавления к ее связям дополнительной сетки. Чем лучше показатель сглаживания, тем плавнее оно будет происходить, особенно это важно на уступах модели. Из-за этих условий выбирается High. Особенно важен этот показатель для точности расчета на кромках конструкции.

Функция Transition есть показатель скорости, с которым будет производиться переход от ячейки к ячейке, slow – плавный, fast – резкий. Выбирается Slow с целью плавности перехода и точности проведения численного эксперимента.

Точность Span Angle Center необходима, когда в конструкции аппарата имеется большое количество криволинейных регионов. Эта функция отвечает за угол, под которым друг к другу располагаются ячейки сетки, чем он меньше, тем лучше. Устанавливаем Fine (самый точный расчет) – 12–36°.

Изменения данных точности Relevance варьируют величину констант режимов Curvature and Proximity.

Все остальные параметры, вроде нижеописанных, программа автоматически подбирает сама, исходя из условий, которые ей были заданы, и самой модели, которая была импортирована для решения:

- Curvature Normal Angle – максимально допустимый угол между двумя гранями ячейки. Значение контролируется условиями Relevance и Span Angle Center;

- Proximity Accuracy позволяет контролировать уровень точности вычислений функции размера близости, выполняющимися между парами плоскостей. Подсчитывается как произведение Max Face Size * Num Cells Across Gap * Proximity Accuracy. Чем ближе к единице, тем точнее и медленней производится расчет;
- Num Cells Across Gap – это минимальное количество слоев элементов, для того чтобы смочь сгенерировать промежуток. Зависит от On: Proximity and Curvature или On: Proximity; число подбирается исходя из значения Relevance;
- Min size – минимальный размер ячейки сетки. Применяется при On: Proximity and Curvature или On: Proximity;
- Proximity Min Size только при On: Proximity and Curvature – это значение глобально малого размера ячейки, меньше которого значение быть не может. Должно быть больше 0, но меньше Min Size;
- Max Face Size используется при Use Advanced Size Function: On, применительна для Full и Active Assembly, это максимальный размер в зависимости от функции размера, к которому будет стремиться генератор сетки. В большей степени пропорционален значению на слайдере Relevance, высчитывается при Mechanical и Explicit;
- Max Size используется при Use Advanced Size Function: On. Высчитывается, если нет твердых тел в модели. Это максимальный размер в зависимости от функции размера, к которому будет стремиться генератор сетки;
- Growth Rate – вероятное увеличение длины грани элемента с каждым последующим слоем элементов, применяется при Use Advanced Size Function: On;
- Minimum Edge Length – наименьшая длина грани ячейки модели сетки.

Все, кроме последнего параметра, можно исправлять самостоятельно.

В графе Inflation также, как и везде, имеет большое значение показатель на слайдере Relevance. Inflation option подразумевает под собой функцию, которая бы могла контролировать величину слоев, зависящих от количества элементов конструкции [88], например, таких как:

- Use Automatic Inflation – Program Controlled (т. к. объект в 3D) либо также можно было бы использовать All Faces in Chosen Named Selection (все поверхности в выбранных наименованиях);
- Inflation Option определяет геометрический размер слоев (высоту крайних ячеек, длину ячейки). Smooth transition ставится по умолчанию;
- Transition Ratio задает условия роста ячейки в переходе от одного элемента к другому, устанавливается как значение от 0 до 1;
- Maximum Layers определяет максимальное количество пристеночных слоев, созданных в сетке, для твердых тел – 5, для поверхностей тела – 2; допустимы значения от одного до 1000, при Smooth Trasition производится контроль за этим параметром;
- Growth rate определяет контроль за скоростью роста относительной толщины соседних слоев inflation, допустимы значения от 0,1 (крайне много ячеек, медленный рост) до 5 (быстрый рост); по умолчанию используется значение 1,2;
- Inflation algorithm определяет переходный алгоритм, зависящий от выбранного метода, для 3D-объекта могут быть использованы Patch Conforming Tetrahedrons (контролируемый программой, по умолчанию) и MultiZone;
- View Advanced options по умолчанию задается No, когда ставится Yes (задаются дополнительные опции, такие как Collision Avoidance (создает обновление участка с чересчур перемельченными ячейками), Maximum Height over Base (устанавливает отношение высоты тетраэдральной ячейки к ее основанию), Growth Rate Type (рост слоев инфляции, как вариант: геометрический, экспоненциальный или линейный), Maximum Angle (от 90–180°, максимальный угол между плоскостями), Fillet Ratio (сглаживает повороты сетки на кромках, 0–1, при 1 – максимальное смягчение), Use Post Smoothing (улучшает сглаживание переходов от ячейки к ячейке), Smoothing Iterations (количество итераций по сглаживанию, от 1–20, по умолчанию 5).

Advanced: – Shape checking – тип расчета, в случае исследования с потоком выбирается CFD:

- Element midside nodes позволяет создать середину каждой стороны ячейки для увеличения количества квадратных элементов;
- Straight sided elements участвует лишь в электромагнитном моделировании;
- Number of retries – количество перепостроений сетки для создания наиболее качественного контента, от 0–4, при CFD – 4 по умолчанию;
- Extra retries for Assembly – дополнительные усилия, отвечающие за качество сетки;
- Mesh Morphing при включении дает возможность вручную контролировать все настройки (особенно хороша, если конструкция состоит из отдельных элементов).

Defeaturing, Pinch Tolerance (доработки, пинч-терпимость):

- Generate pinch on refresh (позволяет убрать мелкие лишние скопления ячеек);
- Automatic Mesh Based Defeaturing, соответственно, будет ли автоматически обновляться сетка при выведении этого параметра на Workbench, что позволило бы все контролировать за пределами модуля Meshing).

В связи с тем, что памяти компьютера не хватало на создание идеальной с точки зрения расчета сетки, было принято Relevance Center – Coarse, Smoothing – Medium, Span Angle Center – Fine, Proximity Accuracy – 0,6; Use Automatic Inflation – None, Advanced – CFD, Dropped (рисунок 2.2). Количество ячеек – 1903758, элементов – 10575763. Данная сетка позволяла проводить численный эксперимент с минимальным значением погрешности.

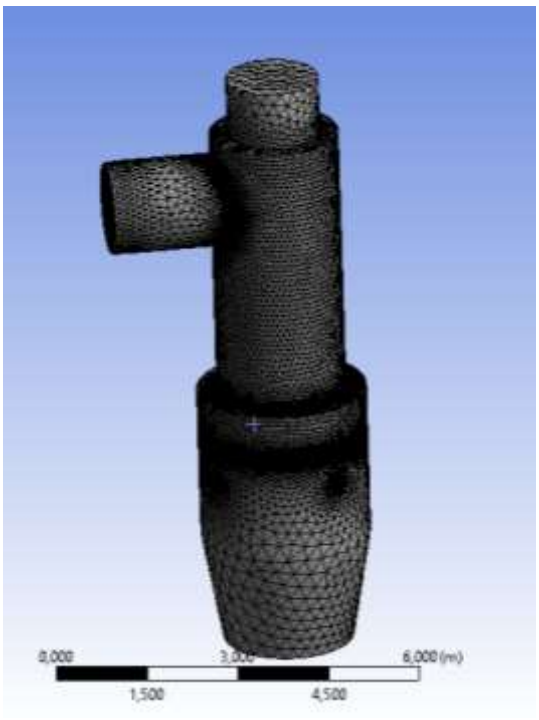


Рисунок 2.2 – Изображение сетки проточной части ИВЗ в Meshing
(для программного модуля CFX)

2.2.2. Модуль ANSYS CFX

Модуль ANSYS CFX v. 14.5 является мощной и надежной технологией для расчетов в области вычислительной гидрогазодинамики. ANSYS CFX совмещает в себе передовую технологию решателя с современным пользовательским интерфейсом и адаптивной архитектурой, что делает этот инструмент доступным как для разработчиков, владеющих общими инженерными знаниями, так и для специалистов в области гидрогазодинамики, работающими с моделью и ее свойствами на глубоком уровне. CFX позволяет детально изучить оборудование и процессы изнутри, повысить эффективность, увеличить срок службы и оптимизировать процессы.

Модуль ANSYS CFX полностью интегрирован в расчетную среду ANSYS Workbench-платформу, объединяющую все инструменты инженерного моделирования компании ANSYS.

Для проведения расчетов ANSYS CFX использует импортированные или построенные модели (ANSYS Meshing) реальных объектов. ANSYS Meshing

предоставляет множество технологий построения сетки в одном приложении. Это дает возможность выбрать наиболее подходящий способ построения сетки для каждой из деталей сборки.

Ядром модуля ANSYS CFX является передовой алгебраический многосеточный сопряженный решатель, использующий технологию Coupled Algebraic Multigrid, являющуюся ключом к получению точных результатов в короткие сроки. Параметры решателя, граничные условия могут быть скорректированы во время выполнения расчета, при этом нет необходимости прекращать работу решателя. Решатель ANSYS CFX использует схему дискретизации второго порядка по умолчанию, обеспечивая получение максимально точных результатов.

Точность расчетов связана с выбором доступных физических моделей. Модуль ANSYS CFX содержит в себе широкий набор физических моделей. Что немаловажно, полная таблица возможностей обеспечивает максимальное взаимодействие между физическими моделями со всеми типами элементов и со всеми типами соединений сеточных интерфейсов для выполнения сложных междисциплинарных расчетов [89, 90, 91, 92, 93].

Для детализации математического моделирования [94], происходящего в программном обеспечении ANSYS CFX, были извлечены и переведены на русский язык внутрипрограммные описания процесса моделирования.

В рамках модели движения частиц общий поток частиц фазы смоделирован с помощью отслеживания малого количества частиц, проходящих через сплошную среду жидкости. Частицы могут быть как твердыми, так и находиться в виде капель или пузырьков.

Применение уравнения Лагранжа [95] в программе ANSYS CFX включает в себя интеграцию траекторий частиц через дискретизированную область. Отдельные частицы следуют из их исходной точки (входа) до той поры, пока они выйдут из области или пока некоторые объединения предельных критериев не станут удовлетворены. Каждая частица вводится по очереди, чтобы достичь средней из всех возможных траекторий частиц и создать начальные условия для гидродинамических уравнений массы, импульса и энергии. Поскольку каждая

отдельная частица следует из ее вводной точки до точки назначения (выход/бункер), процедура расчета является применимой к анализу установившегося нестационарного течения.

В численном эксперименте рассматривается движение установившегося потока: вязкость, плотность, температура постоянна; скорость же зависит от местных сопротивлений проточной части установки (рисунок 2.3).

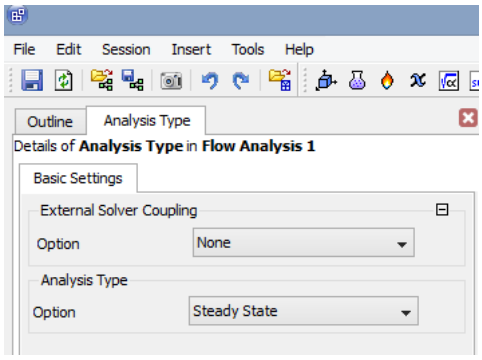


Рисунок 2.3 – Установившиеся и неустановившиеся (переходные) процессы

Показатель установившегося течения – Steady State; показатель того, что мы анализируем переходный режим движения потока – модуль Transient (рисунок 2.4).

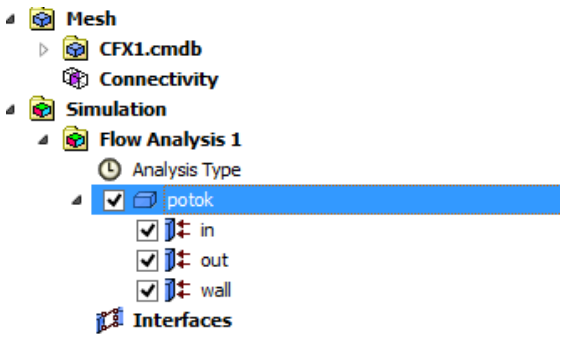


Рисунок 2.4 – Составляющие анализа движения потока

Domain (рисунок 2.5) позволяет создать поток, обладающий индивидуальными физическими и химическими свойствами. В рамках данной диссертационной работы был создан поток уходящих дымовых газов. Для этого введены понятия в разделе Materials: gas (газ) и ash (зола). И т. к. материалы были взаимосвязаны по ходу движения газового тракта, было принято не разделять их в разные Domain, а объединить в один с описанием сопротивления одной составляющей относительно другой.

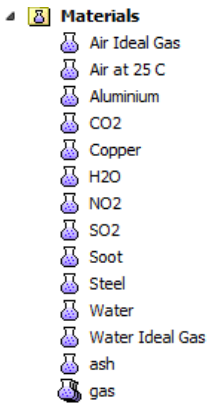


Рисунок 2.5 – Список веществ, применимых для создания потока Domain

Газ (рисунок 2.6) рассматривается как гетерогенная смесь веществ после горения, таких как CO_2, H_2O, NO_2, SO_2; задается его агрегатное состояние – газообразное, а также массовая доля каждого составляющего, таким образом, чтобы сумма всех компонентов была равной единице. В этом расчете использовано такое понятие, как Ideal Mixture (идеальная смесь) (рисунок 2.6), это значит, что физические характеристики для всего потока газа берутся усредненными по данным каждого из компонентов.

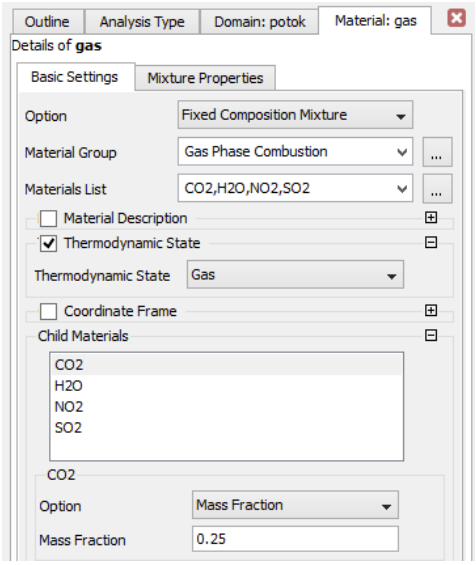


Рисунок 2.6 – Описание составляющих несущего потока

Для описания потока золы (ash) также необходимо присвоение ее агрегатного состояния: твердое (Solid); значение молярной массы вещества и плотности.

В работе рассматривается зола после сжигания угля Экибастузского месторождения 2СС (таблица 2.1).

$$\mu(SiO_2) = 28{,}086 + 2 \cdot 15{,}994 = 60{,}074 \left(\frac{г}{моль}\right), \quad (2.30)$$

$$\mu(Al_2O_3) = 26{,}9814 \cdot 2 + 15{,}994 \cdot 3 = 101{,}9448 \left(\frac{г}{моль}\right), \quad (2.31)$$

$$\mu(Fe_2O_3) = 55{,}847 \cdot 2 + 15{,}994 \cdot 3 = 103{,}8292 \left(\frac{г}{моль}\right), \quad (2.32)$$

$$\mu(CaO) = 40{,}08 + 15{,}994 = 56{,}074 \left(\frac{г}{моль}\right), \quad (2.33)$$

$$\mu(MgO) = 24{,}305 + 15{,}994 = 40{,}299 \left(\frac{г}{моль}\right), \quad (2.34)$$

$$\mu(SO_3) = 32{,}06 + 3 \cdot 15{,}994 = 80{,}042 \left(\frac{г}{моль}\right), \quad (2.35)$$

$$\mu(K_2O) = 39{,}083 \cdot 2 + 15{,}994 = 94{,}16 \left(\frac{г}{моль}\right). \quad (2.36)$$

$$\mu(ash) = 0{,}62 \cdot \mu(SiO_2) + 0{,}3 \cdot \mu(Al_2O_3) + 0{,}05 \cdot \mu(Fe_2O_3) + 0{,}02 \cdot \mu(CaO + MgO) + 0{,}001 \cdot \mu(SO_3) + 0{,}007 \cdot \mu(R_2O) = 0{,}62 \cdot 60{,}074 + 0{,}3 \cdot 101{,}9448 + 0{,}05 \cdot 103{,}8292 + 0{,}02 \cdot (56{,}074 + 40{,}0299) + 0{,}001 \cdot 80{,}042 + 0{,}007 \cdot 94{,}16 = 75{,}68402 \left(\frac{г}{моль}\right) = 0{,}075864 \left(\frac{кг}{моль}\right). \quad (2.37)$$

Таблица 2.1 – Химический состав золы экибастузского угля

Месторождение углей	Содержание, мас.%						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO+MgO	SO_3	R_2O	$\Delta m_{прк}$
Требование ГОСТ 25818	> 45			< 10	< 2	< 3	< 5
Подмосковное	45,8	33,8	9,1	4,6	1,8	0,9	3,5
Кузнецкое	54,0	23,5	7,0	9,5	0,6	4,1	1,2
Канско-Ачинское	31,0	13,0	17,0	5,0	–	1,0	1,0
Восточно-сибирское	71,4	11,8	4,7	3,4	0,3	–	8,2
Экибастузское	62,0	30,0	5,0	2,0	0,1	0,7	1,0
Среднее содержание элементов в земной коре	61,2	15,4	6,6	5,7	0,1	5,0	

Плотность золы взята из справочной литературы (рисунок 2.7).

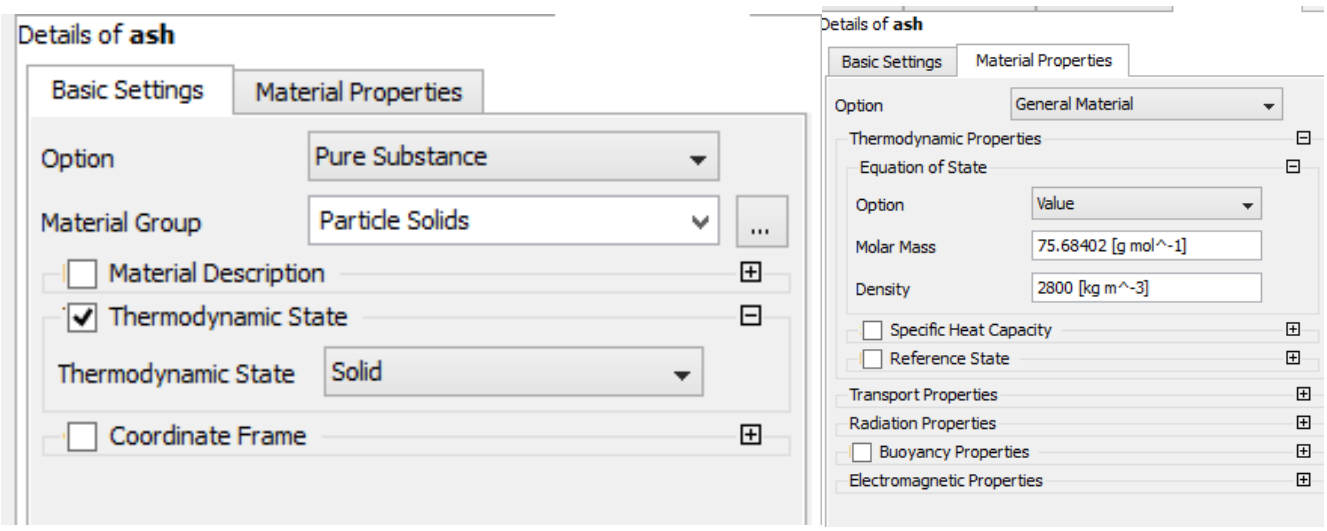


Рисунок 2.7 – Создание материала для потока «зола»

После создания отдельных компонентов материалов переходят к описанию гетерогенного потока. В Domain type используем такое агрегатное состояние потока, как «жидкость» (Fluid Domain) из-за применения подобного термина в гидрогазодинамике [96], который там относится как к жидкостям, так и к газам.

Ранее оговаривалось, что мы рассматриваем поток, состоящий из двух компонентов: газов и частиц. В пункте Domain нужно прописать, как взаимодействуют эти вещества друг с другом или не взаимодействуют вообще. Газ – это Continuous Fluid (несущая среда), минимальный объем которой составляет 0,975; частицы же – Particle Transport Fluid (подобное описание может относиться как к твердым частицам, так и к жидким – каплям, которые движимы основной средой, занимающей максимальный объем). Область диссертационного исследования затрагивает гранулометрический состав золы представленный на рисунке 4.2. Reference pressure – относительное (опорное давление), равно 0 Па. Исходя из справки Ansys, можно констатировать, что это значение напрямую зависит от выходного Static Pressure. Если на выходном патрубке стоит 100000 Па, то опорное давление должно быть равно 0 Па и наоборот (абсолютное давление $P_{абс}=P_o+P_{изб}$, где P_o – reference pressure [97] (атмосферное давление), $P_{изб}$ – избыточное давление). Значение давления используется, для того чтобы избежать ошибок в расчете. Это может произойти, когда появляется изменение динамического давления в жидкости, что и приводит в действие поток. Каждый раз, когда создается новый

Domain или вносятся изменения в существующий домен, опорное давление в этой области применяется ко всем составляющим потока, оно не изменяется в течение времени.

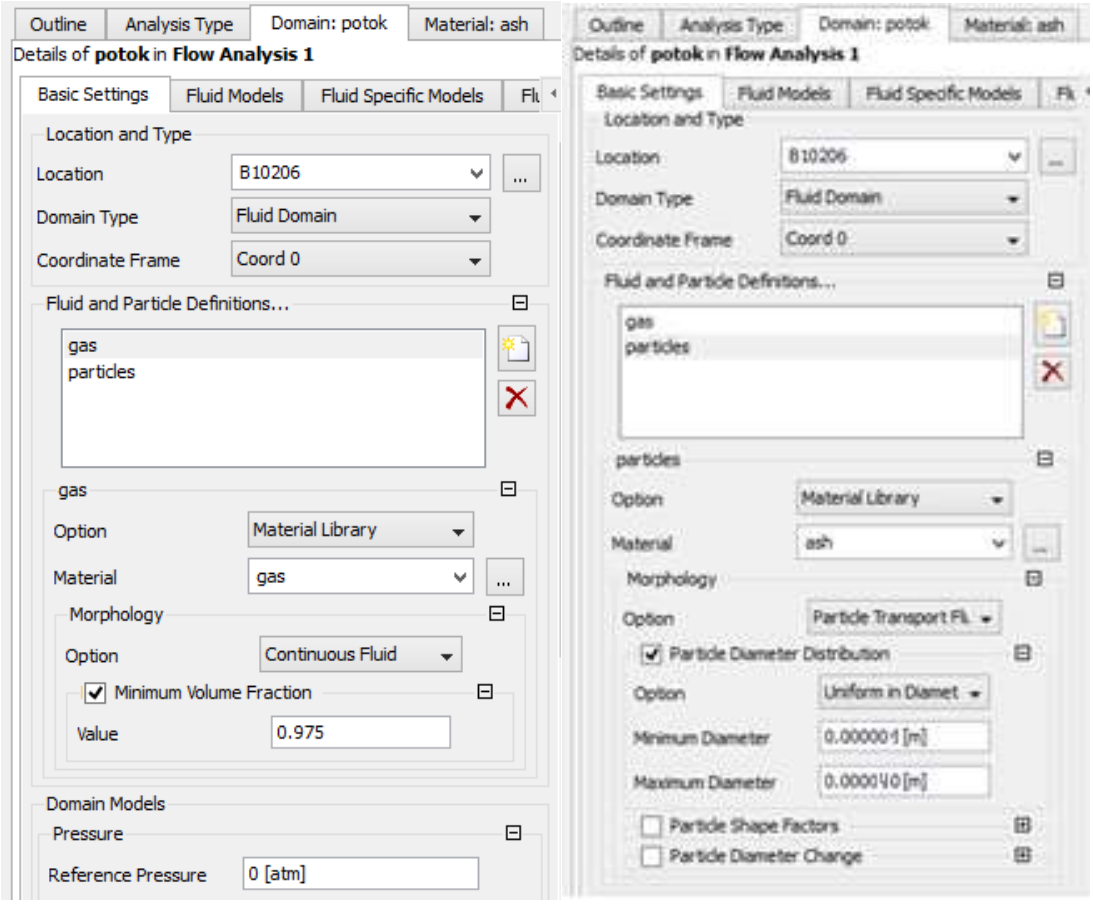


Рисунок 2.8 – Описание полного потока

Следующая часть для обоих составляющих потока (рисунок 2.8) одинакова. Включена функция Buoyant (гравитация), тем самым происходит учет силы тяжести по отношению к движимому потоку. Buoy. Ref. Density – усредненная плотность уходящих газов. Так как подавляющая часть потока – газы, а частицы золы составляют лишь < 10 %, то принято ориентировать Buoy. Ref. Density по плотности газов. Сама установка ИВЗ статична, поэтому Domain motion – Stationary. Mesh Deformation (сеточные изменения) отсутствуют (рисунок 2.9).

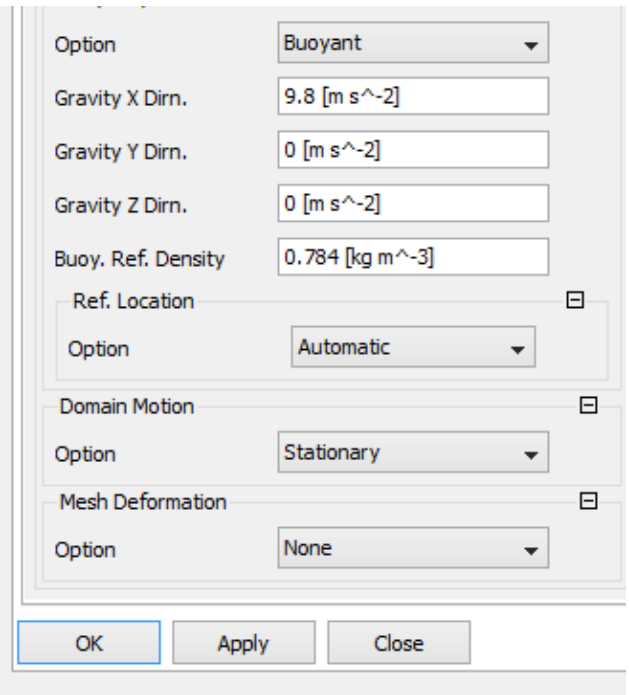


Рисунок 2.9 – Выталкивающая сила и вращение Domain в пространстве

Процесс идет изотермично при температуре 130 °C.

Модель турбулентности – k-epsilon. Это одна из самых известных моделей турбулентности, она была реализована в большинстве общих назначений CFD-кодов и считается стандартной моделью. Доказано, что она является стабильной и надежной численно и имеет хорошо установленный режим интеллектуального потенциала. k-ε модель предоставляет хорошую альтернативу другим моделям с точки зрения точности и надежности.

В CFX k-ε модель турбулентности использует подход пристеночной функции, улучшающий надежность и точность при масштабировании пристеночной сетки до очень тонких и небольших элементов. Масштабируемость пристеночной сетки позволяет осуществлять решение произвольно мелких пристеночных рядов сетки, что является значительным улучшением по сравнению с предложениями иных моделей турбулентности.

В то же время стандартные модели с двумя уравнениями, такие как k-ε модели, обеспечивают хорошие прогнозы для многих видов потоков с точки зрения инженерного интереса, существуют задачи, для которых эти модели не могут быть пригодны. Среди них:

- потоки с разделением пограничного слоя;
- потоки с внезапными изменениями в средней скорости деформации;
- потоки вращающихся жидкостей (процесс сжатия энергоносителя на рабочем колесе);
- потоки, движущиеся на изогнутых поверхностях.

Production and Dissipation в графе Buoyancy Turbulence будут отслеживать влияние вязкостных сил на эффективность установки.

Горения нет, поэтому Combustion – None, Thermal radiation – тоже нет, так как рассматривается процесс без теплообмена (рисунок 2.10)

Рисунок 2.10 – Модель турбулентности, теплообмен

Drag Force – силы трения или сопротивления. Из всевозможных вариантов выбрана модель Schiller Naumann. Она используется только для твердых сферических частиц или жидких частиц, которые достаточно малы, и из-за этого они могут быть рассмотрены как объекты сферической формы. Для несферических частиц применяется кривая влияния, полученная из эксперимента.

Такая корреляция, как Schiller Naumann, происходит при обтекании единичной сферической частицы, это справедливо только в разбавленном пределе очень мелких фракций твердого фазового объема (рисунок 2.11).

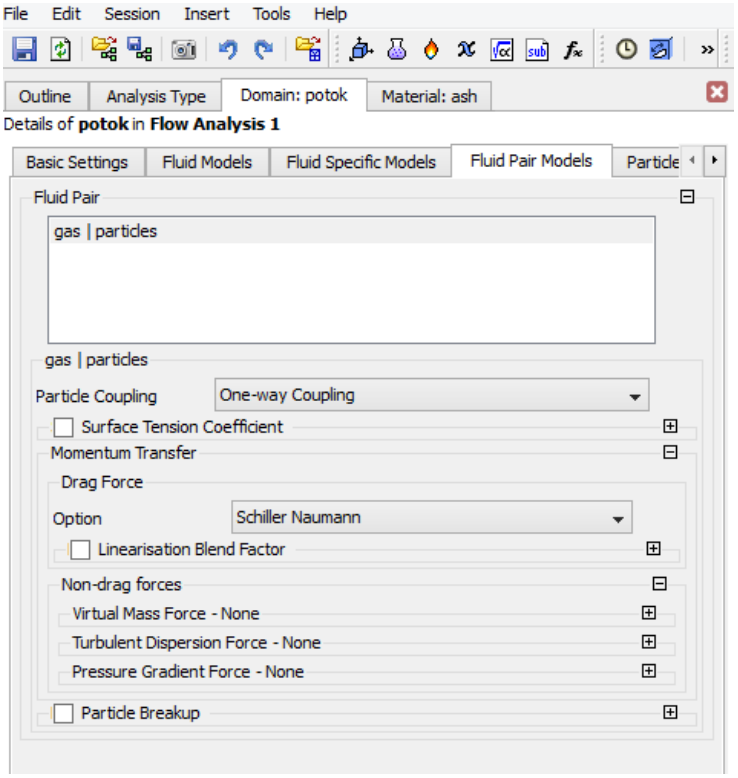


Рисунок 2.11 – Влияние частиц на поток

Virtual Mass Force – None, т. к. она пропорциональна плотности непрерывной фазы, следовательно, является наиболее значимой, когда плотность дисперсной фазы меньше плотности непрерывной фазы. Кроме того, по своей природе она имеет значение только в присутствии больших ускорений, например, в переходных потоках Transient.

Turbulent Dispersion Force [102] приводит к дополнительной дисперсии фазы от регионов с высокой объемной долей к регионам с уровнем низкой объемной доли из-за турбулентных пульсаций. Это вызвано совместным действием турбулентных вихрей и межфазного сопротивления. Например, в дисперсных двухфазных потоках дисперсные частицы попадают в непрерывную фазу турбулентных завихрений и транспортируются под действием межфазного сопротивления. Эффект состоит в перемещении частиц из областей с высокой к низкой концентрации. Следовательно, этот эффект, как правило, важен в турбулентных потоках, имеющих значительное межфазное сопротивление.

Pressure Gradient Force мала для частиц более высокой плотности, чем плотность непрерывной среды, и из-за этого нет необходимости ее включать.

Граничными условиями на входе и выходе являются: полное давление на входе в установку для обеих сред – 100000 Па (рисунок 2.12).

Номинальная турбулентная интенсивность лежит в диапазоне от 1 % до 5 %, но будет зависеть от конкретного применения. Значение турбулентной интенсивности по умолчанию 0,037 (то есть 3,7 %), оно является достаточным для номинальной турбулентности через круглое входное отверстие, и имеет хорошую оценку в отсутствии экспериментальных данных.

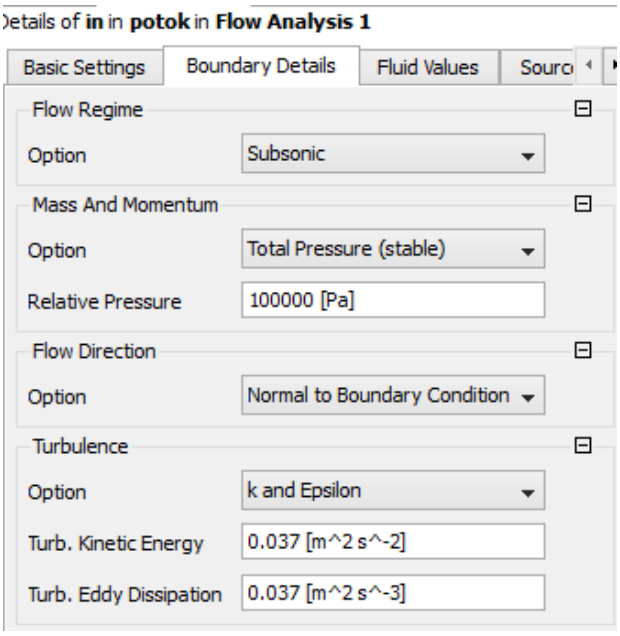


Рисунок 2.12 – Выбор граничных условий на входе

Рассмотрим свойства впрыскиваемых частиц золы. Выбор скорости – Zero Slip Velocity (нулевая скорость скольжения). Параметр нулевой скорости скольжения подводит частицы, которые будут введены в местной скорости жидкости в сочетании с непрерывной фазой. Particle Position – uniform injection – локальный нерегулируемый впрыск Random. Number of positions задает количество просчитываемых ANSYS-ом траекторий частиц. Particle mass flow – массовый расход частиц. По условиям хоздоговорной темы № 15001 на один аппарат поступает объемный расход газов, равный 150000 м^3/ч (рисунок 2.13). В формуле 2.38 показан пересчет объемного расхода в массовый, если усредненная плотность потока 0,784 кг/м^3.

$$150000\,\frac{\text{м}^3}{\text{ч}} = 150000\,\frac{\text{м}^3}{\text{ч}} * 0{,}784\,\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = \frac{117600\frac{\text{кг}}{\text{ч}}}{3600} = 32{,}67\,\frac{\text{кг}}{\text{с}} \qquad (2.38)$$

Рисунок 2.13 – Граничные условия на входе по твердым частицам, находящимся в потоке

На выходе ставим давление, которое бы создавалось благодаря дымососу. Pressure profile Blend находится в интервале от 0 до 1. Чем ближе к 0, тем больше вероятности перемены значения, которое задается нами (рисунок 2.14).

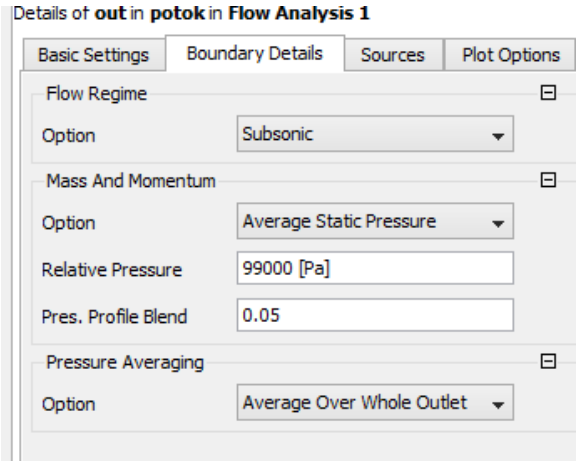


Рисунок 2.14 – Граничные условия потока на выходе

На стене задаем минимальную шероховатость, равную 0,0001 м, без проскальзывания (рисунок 2.14).

На рисунке 2.15 задаются параметры коэффициентов параллельности и перпендикулярности. Чем ближе они к единице, тем ближе к 90° отскок частицы

от стенки установки. Если Perpendicular Coeff. равен 0, то стенкой будет поглощаться траектория частицы, которая ее коснется.

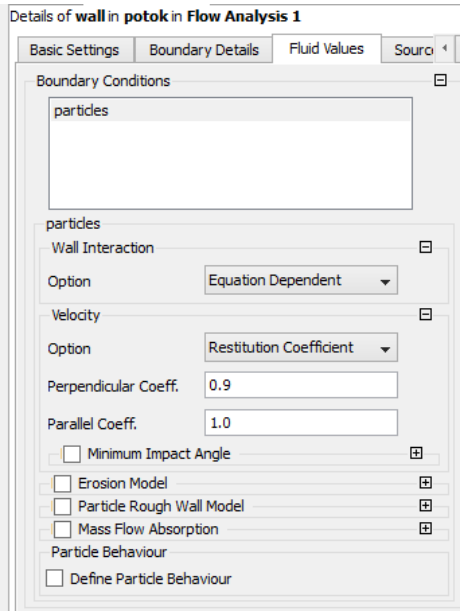


Рисунок 2.15 – Свойства потока на стенках

По ходу расчета в модуле Solver точность эксперимента составила 0,0001. А эффективность улавливания частиц – 90 %, что соответствует данным по улавливанию, найденным экспериментальным путем. Математическую модель можно считать верной, т. к. она может быть принята не только для малых, но и для больших установок. Данная математическая модель верифицирована на установке ИВЗ первого поколения.

Выводы к главе 2

1. В главе 2 представлены описание и характеристика методики исследования. Приведено подробное описание последовательного выбора рабочих параметров для расчета характеристик движения запыленного потока.
2. Обоснован выбор подходящей математической модели с условиями замыкания.
3. Произведена оценка влияния погрешности на результат численного эксперимента.

ГЛАВА 3. ВЕРИФИКАЦИЯ

3.1. Верификация математической модели на полупромышленном образце ИВЗ первого поколения

Для доказательства корректности математической модели, примененной в расчетах сетки установки нецилиндрического типа, было необходимо произвести расчет уже известной золоулавливающей модели и получить результаты, хорошо корреспондирующиеся с полученными в натурном полупромышленном эксперименте (§ 1.3). В данной главе опытным образцом стала полупромышленная модель ИВЗ первого поколения, с которой проводился натурный эксперимент в 2009 г. С помощью червячного редуктора производилось перемещение рассекателя в вертикальной плоскости. Для численного эксперимента был взят перепад давления из натурного эксперимента с наибольшей эффективностью установки, т. е. при максимально высоком положении рассекателя и минимальном проходном сечении для газов около поворотной камеры. Также идентифицировалась скорость на входном участке по результатам натурных испытаний.

Из рисунка 3.1. можно отметить, что конструкция отличается от последующего золоуловителя: на корпусе аппарата есть расширяющиеся и сужающиеся участки, рассекатель выполнен коротким, зоны поворотной камеры невысокие. Однако не стоит забывать, что установка, описанная в данной главе, работала при расходе запыленных газов 20400 м^3/ч, а новый образец будет работать уже со 150000 м^3/ч. Запыленность газов в эксперименте с полупромышленным образцом – 100 г/м^3, а с обновленной моделью – 70 г/м^3.

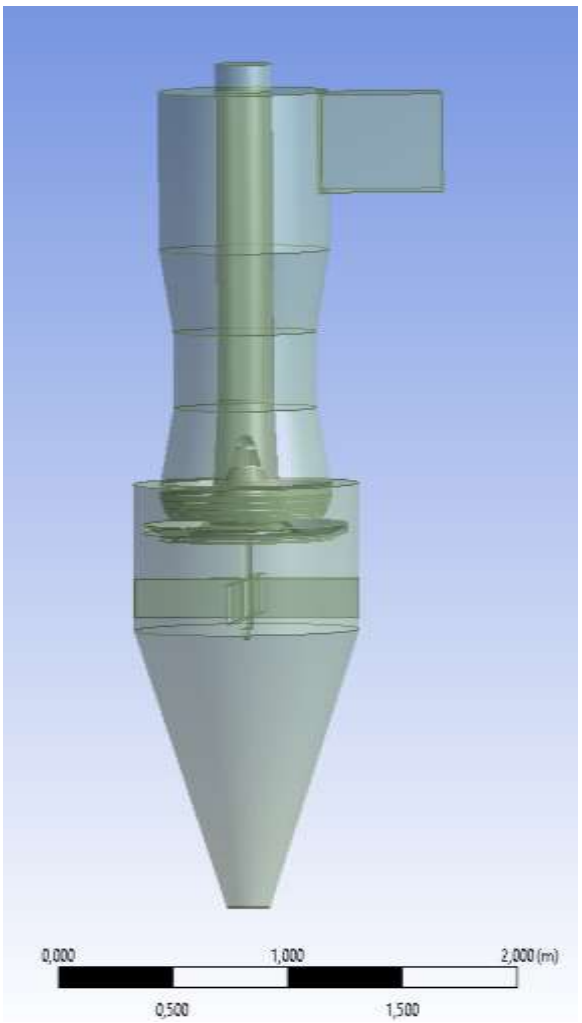


Рисунок 3.1 – Полупромышленный образец ИВЗ первого поколения, изображенный в SolidWorks

На нижеприведенных рисунках цветными линиями обозначено движение потока с распределением скорости в рамках цветной градации, а черными линиями обозначено движение частиц золы.

При граничных условиях: на входе скорость, взятая по среднему сечению ($Q = wF$), а на выходе давление – 1 атмосфера – можно увидеть движение потока, которое идет по верной траектории, соответствующей принципу улавливания данного аппарата. Скорость на конфузорном участке соответствует 129 м/с. Странным является торможение большого количества уловленных частиц в поворотной камере (рисунок 3.2). Эффективность установки – 65 %. Численные значения противоречат данным натурного эксперимента.

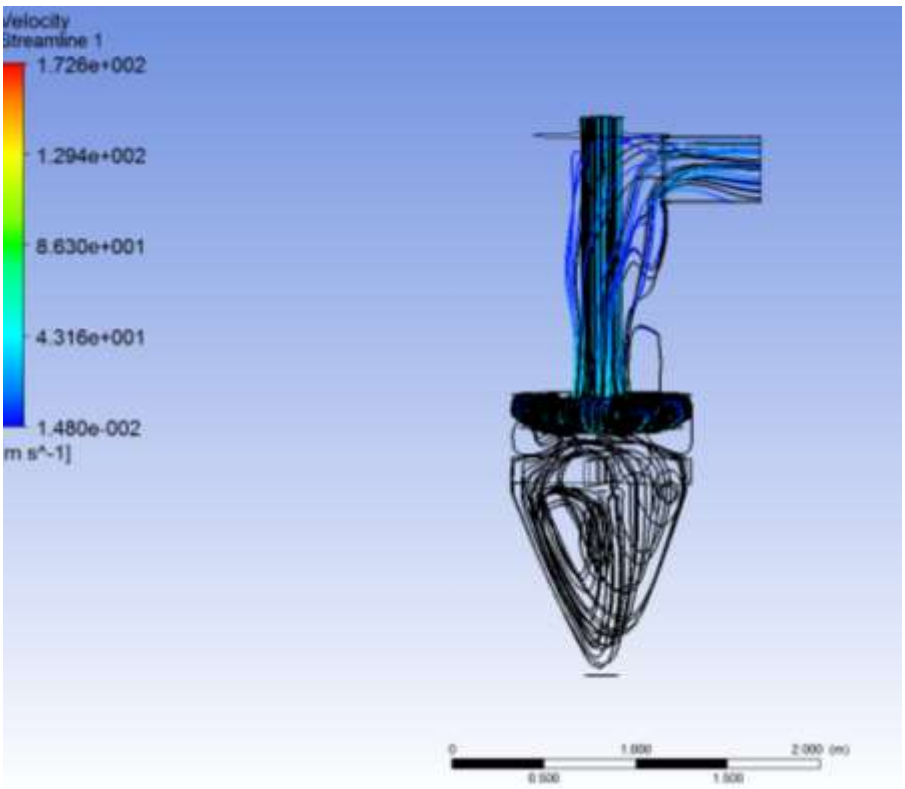


Рисунок 3.2 – ИВЗ первого поколения, численный эксперимент при граничных условиях: скорость на входе, давление на выходе

На рисунке 3.3 задан перепад давления 100000–99000 Па, который можно считать верификацией для ИВЗ (нового вида). Для этих условий часть золы улавливается в аппарате, а другая, оставшаяся часть, направляется в сторону выходного сечения аппарата. При этом 86 % – эффективность улавливания, а скорость, развиваемая потоком, достигает максимума, равного 17 м/с. Эффективность установки при натурном эксперименте равняется 98 %, а скорость на конфузорном участке достигает 27 м/с. Погрешность, возникшая в ходе численного эксперимента, могла появиться из-за неточностей воссоздания рассекателя, который был использован в натурном эксперименте. Однако сохраняется суть работы антициклона, и при увеличении скорости увеличивается эффективность золоулавливающего аппарата. Численные значения хорошо корреспондируются с данными натурного эксперимента. В связи с наличием отверстий в аппарате только при данных граничных условиях разрежение в бункере соответствовало данным натурного эксперимента.

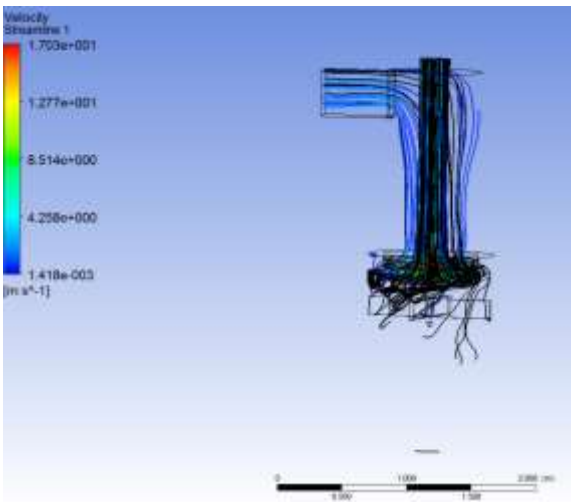


Рисунок 3.3 – ИВЗ первого поколения при граничных условиях:
давление на входе, давление на выходе

На рисунке 3.4. представлено изображение результата постановки граничных условий третьего численного эксперимента. На входе массовый расход уходящих газов, на выходе – атмосферное давление. Полученные результаты некорректны: скорости потока достигают 399 м/с, эффективность улавливания – 86 %, частицы улавливаются поворотной камерой.

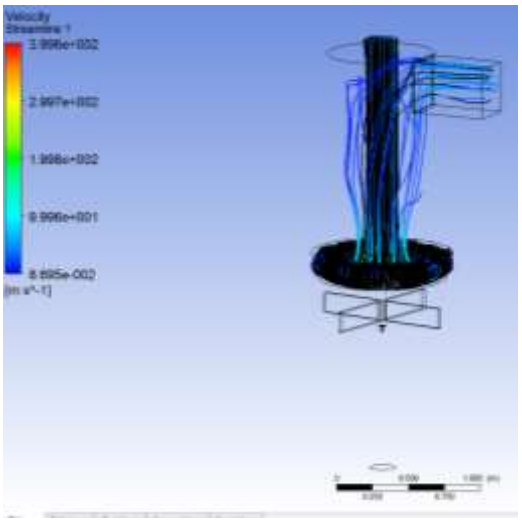


Рисунок 3.4. – ИВЗ первого поколения, численный эксперимент:
на входе массовый расход, на выходе атмосферное давление

Для последнего рисунка в этом параграфе по граничным условиям на входе использовался массовый расход, а на выходе – скорость в выходном сечении. Скорости, развиваемые в установке потоком, достигают 593 м/с, из-за этого на иллюстрации много лишних пульсаций, чего не было при проведении натурного

эксперимента и быть не могло. А также поток в выходной патрубок уходит с двух сторон установки. По этой причине скорость в выходном патрубке может изменяться в широком диапазоне. Вычисление конкретного значения скорости на выходе практически невозможно. А при опытах с полупромышленным образцом не было аппаратов, которые могли бы совершить замеры скоростей (рисунок 3.5).

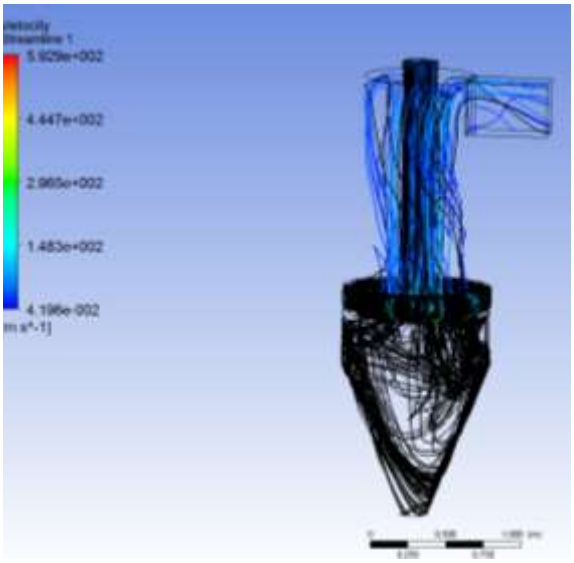


Рисунок 3.5 – ИВЗ первого поколения, численный эксперимент с массовым расходом на входе и скоростью на выходе

Основными критериями качества сетки являются такие параметры, как orthogonality angle (отвечает за векторы нормали к грани в точке интегрирования и за вектор от узла к узлу), expansion factor (отношение минимальной к максимальной длине ячейки сетки), aspect ratio (максимальное значение отношения площадей граней ячейки). Сетка, созданная в программе, соответствовала всем требованиям [99]. Таким образом, погрешность в экспериментах, относимую к неточностям построения сетки, можно устранить.

3.2. Верификация математической модели на образце ИВЗ второго поколения

Новый вид золоулавливающего аппарата был создан после рекомендаций по улучшению предыдущей установки. Был удлинен в высоту рассекатель для

создания эффекта реламиниризации. Также подобное изменение было необходимо для равномерного увеличения скорости потока. Убраны лишние сужающие и расширяющие участки, увеличены по высоте поворотные камеры; вся установка выполнена в рамках $10\ м \times 3\ м \times 3\ м$ по заданию заказчика. Выходное сечение аппарата выполнено таким же диаметром, как входное, целенаправленно для отсутствия возникающего дополнительного сопротивления аппарата. Все геометрические изменения корпуса установки при создании нового ее вида рассчитаны в ANSYS CFX [100] и приведены в главе 4.

В данной главе проводится сравнение разных граничных условий при расчете ИВЗ второго поколения.

На рисунке 3.6 численный эксперимент на ИВЗ второго поколения проводился при граничных условиях: скорость на входе – 5,89 м/с, давление на выходе – 100000 Па. Дисперсный состав золы – 1–40 мкм во всех экспериментах. Скорость высчитана по формуле, в которой она прямо пропорциональна объемному расходу потока на входе и обратно пропорциональна площади входного сечения. Объемный расход дымовых газов – 150000 $м^3$/ч, запыленность частицами потока во всех нижеперечисленных экспериментах указана 70 г/$м^3$. Перепад давления в результате расчета показал 4160 Па либо 416 мм. вод. ст. Исходя из фундаментального принципа работы установки нельзя утверждать о корректности полученных результатов, объемный расход дымовых газов на входе был рассчитан программой неверно. Максимальная скорость, развиваемая потоком в установке – 48 м/с (отображается на цветовой градации на рисунке 3.6). Эффективность около 40 %. Возникают необъяснимые возвратные течения, которые не могут там появиться из-за разрежения, создаваемого дымососом, поток может двигаться только в сторону выходного сечения.

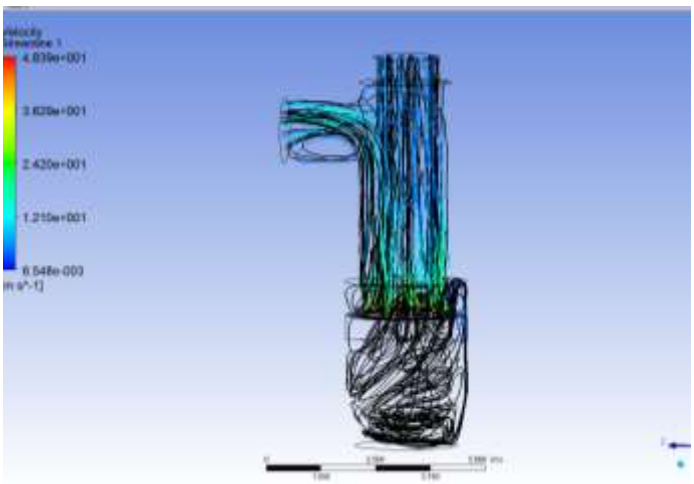


Рисунок 3.6 – ИВЗ второго поколения. Граничные условия:
скорость на входе; давление на выходе

На рисунке 3.7 результаты численного эксперимента при граничных условиях объемного расхода на входе – 150000 м^3/ч, давление на выходе – 100000 Па. Максимальная скорость, развиваемая потоком в аппарате, 23 м/с (на рисунке 3.7). Перепад давления – 15560 Па (1556 мм. вод. ст.). Эффективность улавливания в установке – 60 %. Принцип улавливания прослеживается: подтягивание золовых частиц в область разрежения в поворотной камере, подсос частиц в область под рассекателем. Однако перепад давления чересчур велик относительно того, что возникал в старом полупромышленном образце ИВЗ. По этой причине данные граничные условия было принято считать некорректными.

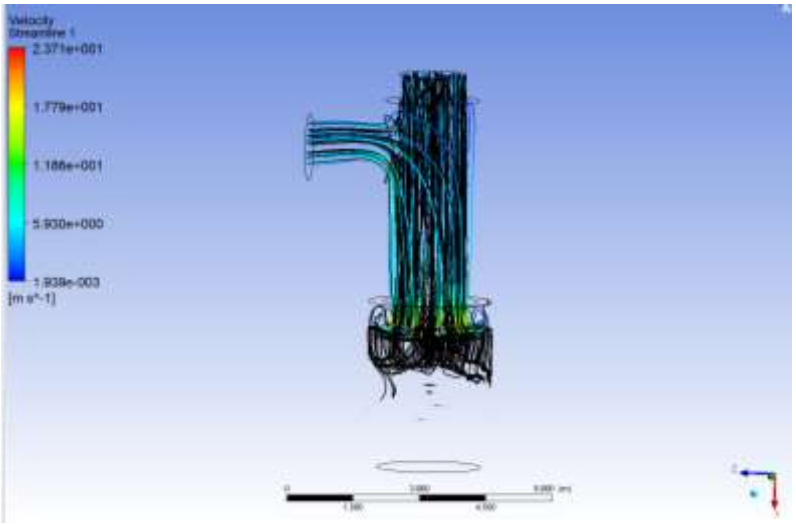


Рисунок 3.7 – ИВЗ второго поколения. Граничные условия:
расход на входе – давление на выходе

На рисунке 3.8 реализуется корректный способ улавливания частиц (давление на входе – 100000 Па, давление на выходе – 99000 Па). Максимальная скорость – 106 м/с. Перепад давления – 1050 Па (105 мм. вод. ст.). Эффективность улавливания в установке – 80 % [98]. Улетают, в основном, мелкие частицы. Большая скорость и, соответственно, более высокий перепад давления наблюдаются из-за того, что рассекатель находился выше положенной по проектным параметрам отметки. Данные граничные условия было принято использовать для нахождения корректной конструкции золоулавливающего устройства. Они взяты по численному расчету ИВЗ первого поколения.

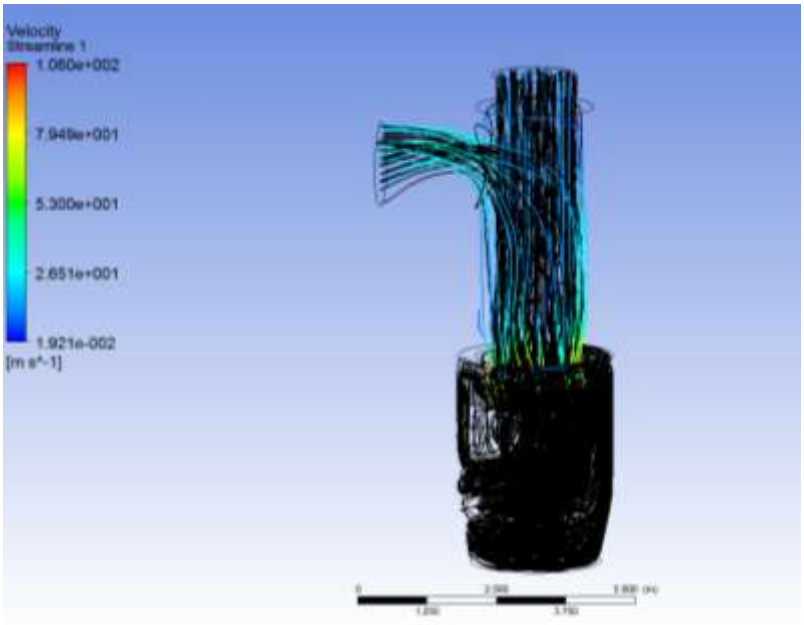


Рисунок 3.8 – ИВЗ второго поколения. Граничные условия:
давление на входе – давление на выходе

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что оптимальными граничными условиями для ИВЗ могут быть давление на входе – давление на выходе, а низкая эффективность идет за счет не совсем концентричного расположения направляющего аппарата и участия в эксперименте частиц золы 1–5 мкм, что снижает эффективность установки [101].

Выводы к главе 3

В главе приведены результаты верификации ИВЗ, на основании которых можно утверждать следующее:

1) адаптирован алгоритм численного эксперимента для полупромышленного образца ИВЗ, получены рабочие параметры золоуловителя, максимально корреспондирующиеся с натурным экспериментом ИВЗ первого поколения;
2) проведены численные эксперименты на проточной части ИВЗ с измененной геометрией по верифицированной методике расчета ИВЗ первого поколения.

ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ИВЗ

В связи с необходимостью отслеживания динамики дисперсного потока было принято решение исследовать различные конструкции золоулавливающей установки (прототипов ИВЗ). На основании данных, полученных в численных экспериментах, будет создана установка с высокой эффективностью.

4.1. Определение степени очистки установки

На рисунке 4.1 представлен финальный вид инерционно-вакуумного золоуловителя [103], на котором была получена наибольшая степень улавливания частиц, порядка 99,5 %.

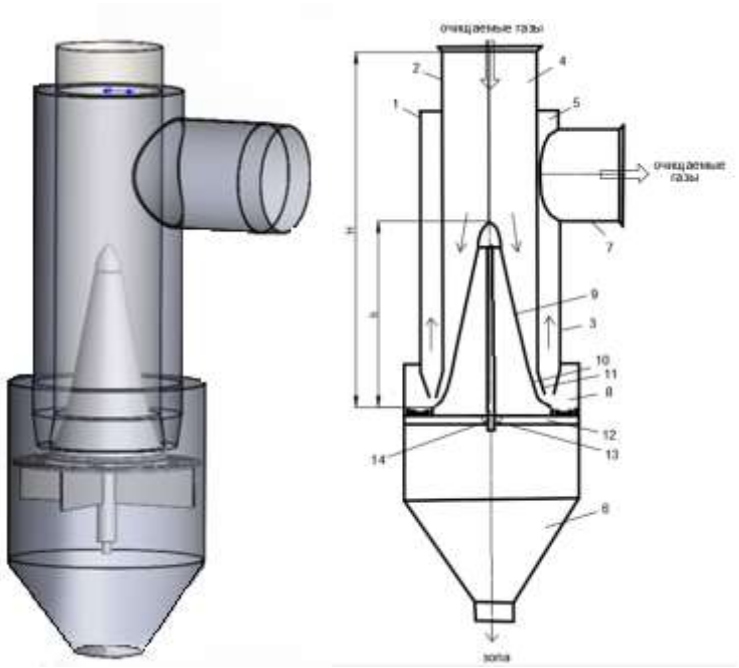


Рисунок 4.1 – Инерционно-вакуумный золоуловитель:
1 – двухступенчатый корпус; *2, 3* – цилиндрические обечайки; *4* – входной патрубок; *5* – канал для очищенных дымовых газов; *6* – золоприемная камера (ЗПК); *7* – выходной патрубок; *8* – поворотная камера (ПК); *9* – рассекатель; *10* – конфузорное выходное сопло; *11* – входной диффузорный участок; *12* – кольца; *13* – удерживающая кольца, крестовина; *14* – ось

В последующем изложении комбинацию использования рассекателя и колец принято называть направляющим аппаратом.

Как видно из рисунка 4.1, ИВЗ содержит вертикально расположенный двухступенчатый корпус *1*, нижняя ступень которого представляет собой золоприемную камеру (ЗПК) *6*, а верхняя – предназначена для золоотделения и выполнена в виде двух соосно расположенных цилиндрических обечаек *2, 3*. Из них внутренняя обечайка *2* служит каналом *4* (входной патрубок) подвода очищаемых дымовых газов, а кольцевое пространство между двумя обечайками – каналом *5* отвода очищенных дымовых газов. Золоотделитель содержит также ПК *8* в нижней части золоотделяющей ступени, сообщающую выход из канала *4* в канал *5* (выходной патрубок). ПК *8* выполнена с кольцами *12* на крестовине *13*, над которой по оси корпуса *1* установлен конусообразный рассекатель *9*. Боковая поверхность последнего совместно с нижней частью внутренней обечайки *2* образуют конфузорное выходное сопло *10* канала *4*. Входной участок *11* кольцевого канала *5* выполнен диффузорным. Высота *h* рассекателя *9* составляет 0,5–0,8 высоты *H* внутренней обечайки *2*, а угол α определяет сужение конфузорного сопла *10*, равен углу повышения степени эффективности β расширения диффузорного участка *11* канала *5* отвода очищенных газов и составляет $\alpha = \beta = (15\ldots20)^{\circ}$. В золоотделителе обеспечивается улучшение аэродинамики движения потока очищаемых дымовых газов в золоотделяющей части ступенчатого корпуса золоотделителя. За счет этого до 99,7 % [105] повышается степень эффективности золоулавливания. Об этом можно судить исходя из результатов численного эксперимента.

ИВЗ второго поколения, представленный на рисунке 4.1, работает на золе угля Экибастузского месторождения (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Элементарный состав экибастузского угля 2СС Р

W_t^r	A^p	S_p^r	S_o^r	C^r	H^r	N^r	O^r
5,0	45,6	0,6		38,4	2,7	0,8	6,9

Низшая теплота сгорания экибастузского угля 2СС – 3490 ккал/кг, зольность на сухую массу 48 %.

Запыленность дымовых газов для высокозольных углей – 60–70 г/м^3. Запыленность газов на Омской ТЭЦ-4 – 70 г/м^3, экибастузский уголь – высокозольный.

Таблица 4.2 – Фракционный состав пылевидного экибастузского угля

Место-рожде-ние, бассейн	Марка топлива	Тип мель-ницы	Размер частиц, мкм								
			0–5 2,5	5–10 7,5	10–20 15	20–30 25	30–40 35	40–60 50	60–80 70	80–100 90	> 100
Экиба-стузское	СС	ШБМ	6	9	46	21	8,3	6,7	–	–	–
		ММТ	9,5	15,5	20	11	7,5	9,5	–	–	–

В числителе предельные значения, в знаменателе – средний размер [106].

Для проведения натурного эксперимента для полупромышленного образца была использована зола экибастузского угля. Она состоит из мелких частиц, дифференциальная кривая распределения частиц по размеру представлена на рисунке 4.2 [107].

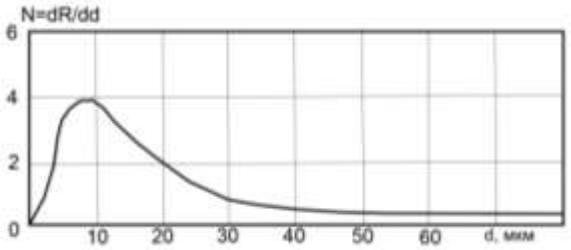


Рисунок 4.2 – Дифференциальная кривая распределения частиц золы экибастузского угля по размеру [107]

К основным характеристикам оборудования для очистки аэрозолей от взвешенных частиц относятся эффективность (степень) очистки воздуха от пыли, которую также иногда называют коэффициентом полезного действия аппарата, хотя это не отражает ее физический смысл (корректное наименование характеристики – «эффективность улавливания»); гидравлическое сопротивление; стоимость очистки. К общим параметрам пылеуловителей относят их производительность по очищаемому газу и энергоемкость, определяемую величиной затрат энергии на очистку 1000 м^3 газа. При оценке эффективности работы пылеуловителей принимают во внимание:

- общую эффективность обеспыливания, или количество пыли, задержанной в пылеуловителе, по отношению к количеству пыли, содержащейся в обеспыливаемом газе;
- фракционную эффективность, определяющую полноту улавливания частиц

определенных размеров; ее выражают процентом отделенных в пылеуловителе частиц пыли определенных размеров;

- остаточное содержание пыли в газе при выходе его из пылеуловителя;
- распределение остатка пыли в газе по размеру частиц или скорости витания.

Кроме того, существенным фактором для оценки эффективности пылеуловителей является расход потребляемой энергии, а при подборе того или иного типа пылеуловителя – частота распределения дисперсности фракций. Основным показателем, характеризующим работу аппаратов очистки воздуха от пыли в тех или иных конкретных случаях их применения, является коэффициент (степень) очистки (эффективность обеспыливания), %, [104]:

$$\varepsilon = \frac{M_{ул}}{M_{вых}} \cdot 100, \tag{4.1}$$

где $M_{вх}$, $M_{ул}$ и $M_{вых}$ – масса частиц пыли, содержащихся в газах на входе в аппарат (т. е. до очистки), уловленных в аппарате и на выходе из аппарата после очистки.

Если не происходит подсоса воздуха в аппарате, эффективность очистки определяют по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_{вых}}{M_{вх}} \cdot 100. \tag{4.2}$$

При наличии подсоса воздуха (например, в рукавных фильтрах) эффективность определяют по формуле:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{M_{вых} \cdot V_{вых}}{M_{вх} \cdot V_{вх}}\right) \cdot 100\ \%. \tag{4.3}$$

Для полной характеристики аппарата нужно знать его фракционную эффективность. Она показывает долю уловленной пыли по каждой фракции. Это позволяет выбрать пылеулавливающее оборудование в соответствии с фракционным составом пыли. Фракционная эффективность очистки выражается отношением:

$$\varepsilon_{ф} = \frac{m_{ф.у}}{M_{ф.н.}} \cdot 100, \tag{4.4}$$

где $m_{ф.у}$ – количество уловленной пыли фракции;

$M_{ф.н}$ – количество поступившей в аппарат пыли фракции.

Общую эффективность аппарата ε [108] определяют по фракционной эффективности следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{M_{ф1}\varepsilon_{ф1}+M_{ф2}\varepsilon_{ф2}+\cdots+M_{фn}\varepsilon_{фn}}{M_{ф1}+M_{ф2}+\cdots+M_{фn}}, \quad (4.5)$$

где $M_{ф1}$, $M_{ф2}$ ..., $M_{фn}$ – масса пыли соответствующих фракций, поступившей в аппарат; $\varepsilon_{ф1}$, $\varepsilon_{ф2}$.., $\varepsilon_{фn}$ – фракционная эффективность улавливания по данной фракции.

4.2. Конструктивные решения, влияющие на качество улавливания в установке

4.2.1. Варианты, проработанные до создания ИВЗ

Ниже представлена иерархия развития конструкций инерционно-вакуумного золоуловителя второго поколения [109]. Исходя из численного эксперимента конструкция, представленная на рисунке 4.3, имеет ход движения запыленного потока, свойственный инерционному аппарату. Отсутствует направляющий аппарат, ПК, кольца как дополнительные элементы, создающие увеличение разрежения по ходу движения газов и, как следствие, увеличение эффективности. Степень улавливания частиц достигает 50 %. При подобном виде и использовании установки дополнительного разрежения в бункере не создается, что не позволяет улавливать частицы. Средняя скорость в установке 27 м/с.

Рисунок 4.3 – ИВЗ второго поколения без направляющего аппарата и поворотной камеры

Отличие рисунка 4.3 от рисунка 4.4 заключается в заглублении входного патрубка. Скорость движения потока при этом увеличивается на 3 м/с, а эффективность повышается лишь на 2 %.

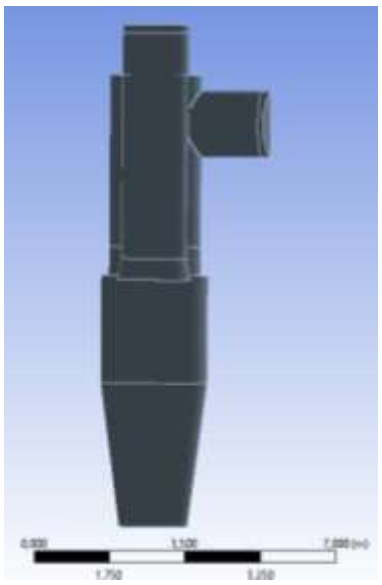


Рисунок 4.4 – ИВЗ второго поколения с заглубленным входным патрубком

На рисунке 4.5 входной патрубок приподнят. Средняя скорость такая же, как и в предыдущем опыте. Эффективность составляет 50 %.

Рисунок 4.5 – ИВЗ второго поколения с приподнятым входным патрубком

Поскольку без дополнительных конструкций не удавалось увеличить степень улавливания установки больше, чем на 2 %, было решено ввести в конструкцию рассекатель [110] для равномерного увеличения скорости дисперсного потока. В конструкции ИВЗ второго поколения, приведенной на рисунке 4.6, эффективность аппарата увеличивается до 75 %. На рисунке 4.6 в разрезе видно, что между направляющим аппаратом и входным патрубком довольно большое расстояние,

поэтому поток не набирает скорость, достаточную для отделения частиц от потока газа, соответственно, и эффективность ниже, чем у финальной версии аппарата (принцип работы антициклона).

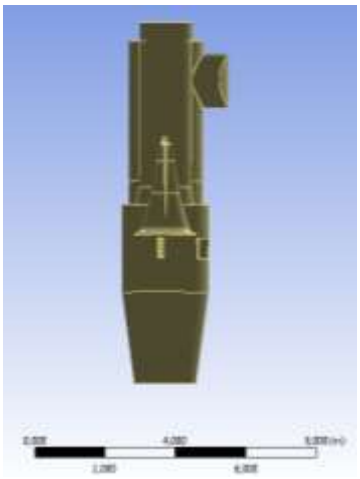


Рисунок 4.6 – ИВЗ второго поколения с рассекателем

В целях экономии металла на бункере его сократили, а поворотные камеры надбавили. Исходя из теоретических предположений разрежение, создаваемое в поворотной камере, должно было дополнительно подтягивать в себя частицы из-за небольшого создаваемого в них разрежения. В них же происходило бы гашение кинетической, набранной на рассекателе, энергии, вследствие чего они под своей силой тяжести ссыпались бы в бункер. Дополнительно для улучшения эффективности конструкция рассекателя на крестовине была приподнята для создания максимальных скоростей. Подобная конструкция дала 90 % эффективности (рисунок 4.7).

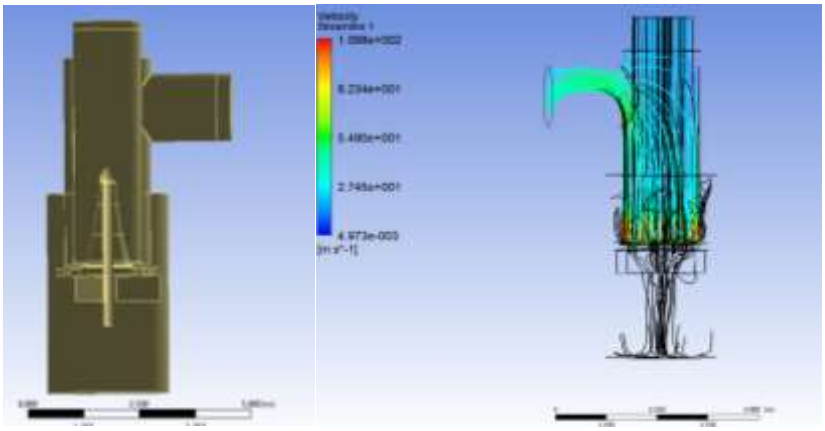


Рисунок 4.7 – ИВЗ второго поколения с добавлением поворотной камеры

4.2.2. Перемещение направляющего аппарата в вертикальной плоскости

Данные численные расчеты понадобились, когда конструкция ИВЗ второго поколения (рисунок 4.1) была принята заказчиком. Подвижный рассекатель – это тот элемент, который сможет увеличить эффективность улавливания ИВЗ, если на входное сечение придет объемный расход газов <150000 м^3/ч.

Граничными условиями для этого были выставлены давление 100 000 Па на входе, давление 99 000 Па на выходе. Задана примерная скорость потока на входе – 5,47 м/с. Массовый расход потока частиц – 2,92 кг/с; распределение диаметра частиц золы от 1 до 40 мкм в потоке; k = 1 м^2/с^2; ε = 0,001 м^2/с^3; усредненная плотность газов – 0,784 кг/м^3; температура уходящих газов – 179 °С; модель турбулентности – k-ε модель. Из рисунка 4.8 видно, что в поворотную камеру направляется по инерции поток зольных частиц. Двигаясь вдоль профиля поворотной камеры, частицы теряют свою кинетическую инерцию и ссыпаются в золовый бункер. Эффективность установки – 99,5 %.

Цветными линиями на рисунках обозначены распределения скоростей по линиям тока уходящих газов, черными – движение частиц угольной золы.

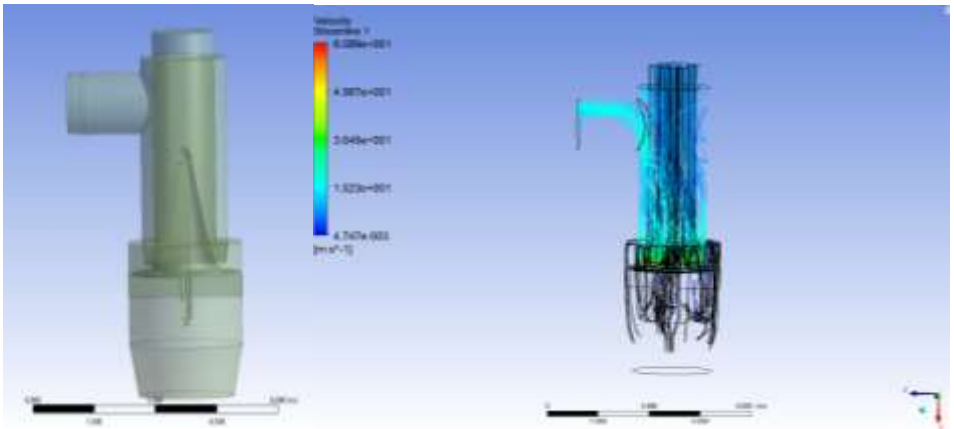


Рисунок 4.8 – ИВЗ второго поколения с рассекателем на определенной опытным путем высоте

Граничные условия, используемые при численном эксперименте (рисунок 4.9), такие же, как и на рисунке 4.8. Направляющий аппарат опущен на тросе вниз, при этом скорость упала до 56 м/с, что резко снизило эффективность установки до 60 %.

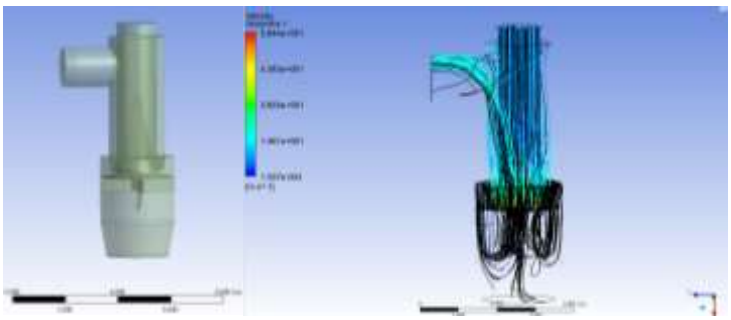


Рисунок 4.9 – ИВЗ второго поколения с опущенным направляющим аппаратом

Граничные условия те же. Направляющий аппарат был приподнят выше, чем на рисунке 4.9. Эффективность установки 65 % (рисунок 4.10).

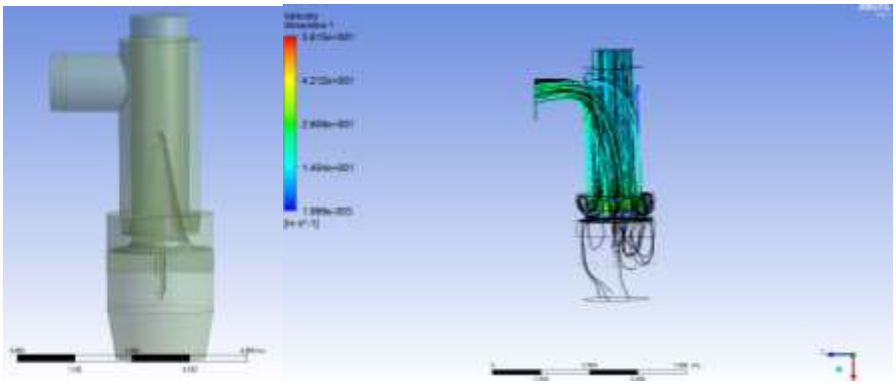


Рисунок 4.10 – ИВЗ второго поколения с приподнятым направляющим аппаратом

Проведение данных численных экспериментов доказало, что эффективности улавливания аппарата можно достигать за счет перемещения направляющего аппарата в вертикальной плоскости. В результате меняется разрежение установки, скорость на конфузорном участке аппарата и эффективность улавливания.

4.2.3. Секционный рассекатель

В связи с трудностью исполнения в металле рассекателя сложной вытянутой единой формы было принято решение разбить рассекатель на секции и проверить, происходит ли падение эффективности улавливания частиц в установке. После проведения трех опытов с разными вариантами секционирования рассекателя можно было установить усредненное значение падения эффективности установки на 5 %. На рисунке 4.11 представлена визуализация результатов численного эксперимента и то, каким образом поделен на секции рассекатель.

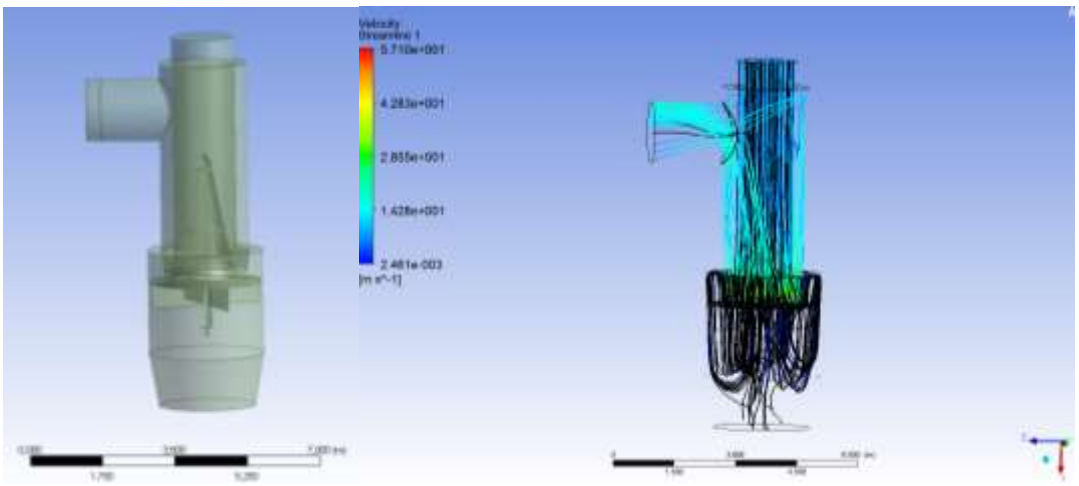


Рисунок 4.11 – ИВЗ второго поколения с секционным рассекателем

Расчеты для параграфов 4.2.2. и 4.2.3. были выполнены по просьбе заказчика ИНТЕР РАО ЕЭС для оценки влияния производственных дефектов и отклонений от численных расчетов на степень эффективности улавливания ИВЗ.

4.3. Влияние изменения отдельных элементов на эффективность установки

4.3.1. Влияние высоты поворотной камеры на эффективность улавливания установки

Поворотная камера помогает улавливать частицы за счет их инерционного движения. В ПК частицы золы теряют свою кинетическую энергию и ссыпаются в бункер за счет силы тяжести.

Однако необходимо было провести численный эксперимент (рисунок 4.12), наглядно и количественно отображающий насколько эффективной будет реализация этой идеи в рамках работы ИВЗ, так как уходящий газ является гетерогенным потоком и сложно предсказать поведение частиц при заданных граничных условиях. На рисунке 4.13 приведен график зависимости между изменением высоты ПК и эффективностью улавливания ИВЗ.

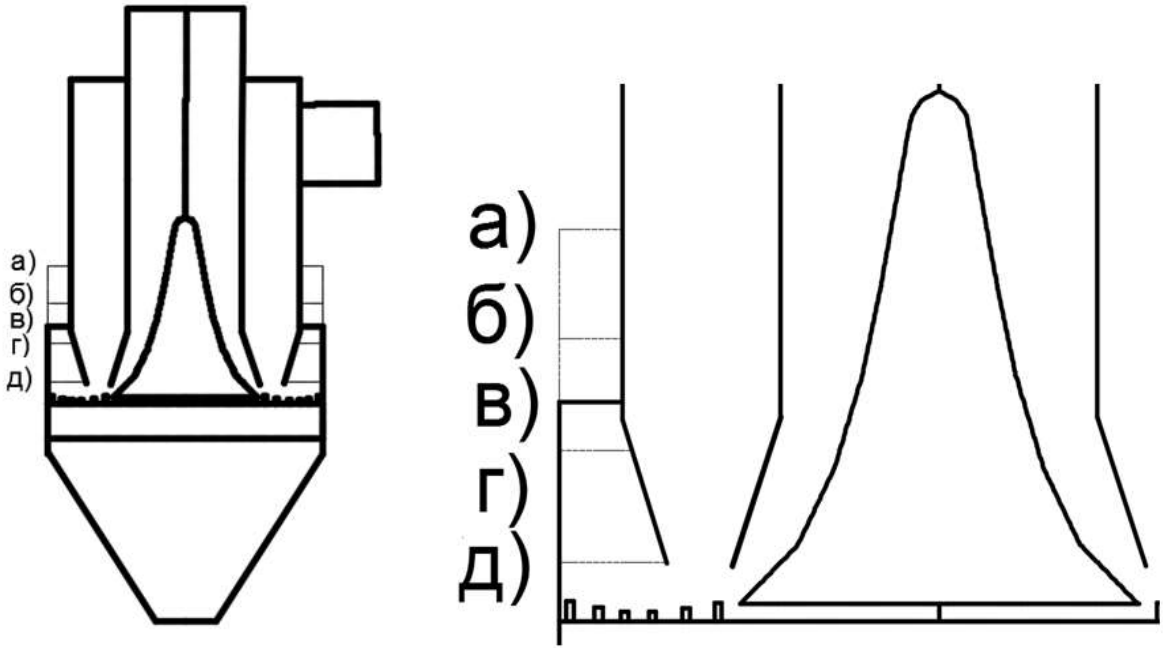


Рисунок 4.12 – Пять отметок поворотной камеры, при которых были проведены расчеты (а). Пунктиром обозначены варианты исполнения ПК, а сплошной линией та высота, на которой остановился автор данного исследования

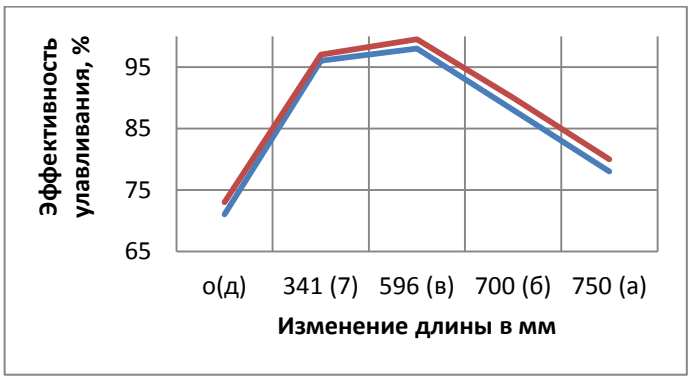


Рисунок 4.13 – Влияние высоты поворотной камеры на эффективность улавливания установки

По графику на рисунке 4.13 можно понять, что при увеличении высоты ПК эффективность улавливания увеличивается только до определенной высоты, а после нее уменьшается. Таким образом, последующее увеличение высоты неоправданно и приводит лишь к бесполезному расходу металла.

Красная линия зависимости на рисунке 4.13 показывает результаты численного эксперимента с граничными условиями после верификации по ИВЗ первого поколения. Синяя линия по граничным условиям, откорректированным по натурному эксперименту ИВЗ второго поколения. В последующих главах представление аналогично.

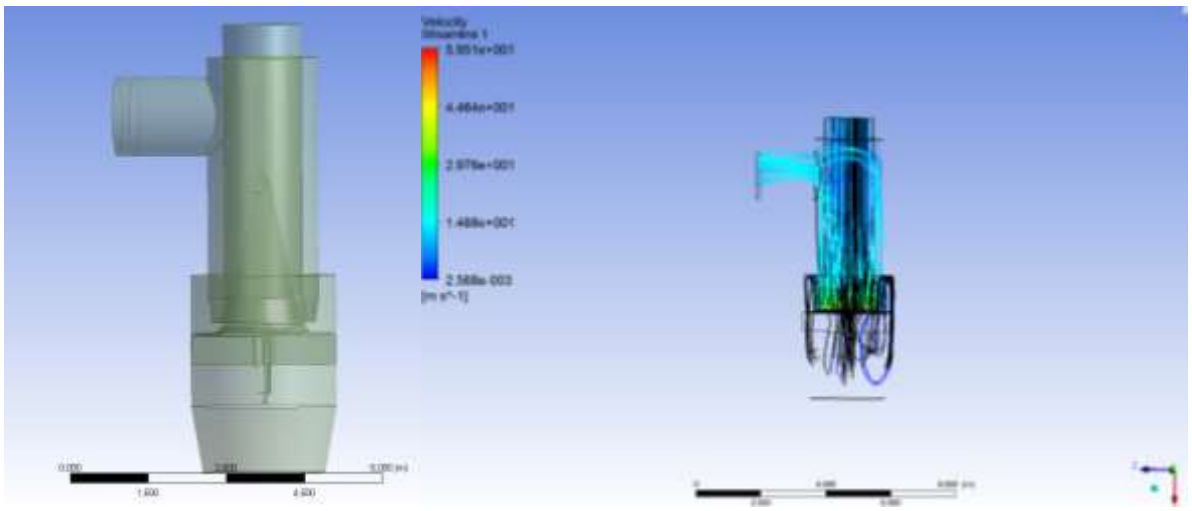


Рисунок 4.14 – ИВЗ второго поколения при высоте ПК 1750 мм

На рисунке 4.15 эффективность установки достигает 98 %. Потерю эффективности можно объяснить тем, что разрежения, создаваемого в столь малых поверхностях, не хватает для подсасывания мелких частиц, которые продолжают свое движение от конфузорного участка вдоль рассекателя на выход.

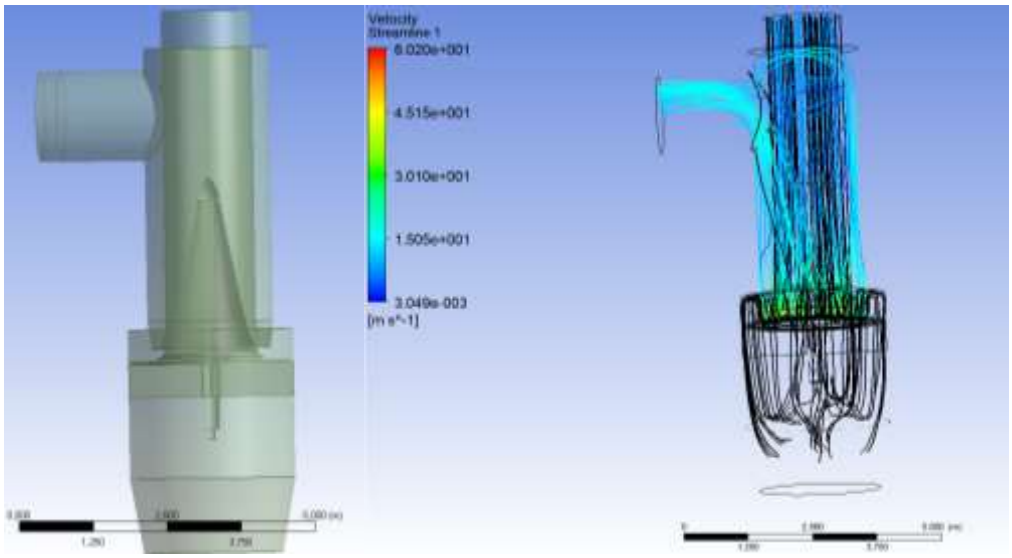


Рисунок 4.15 – ИВЗ второго поколения при высоте ПК 340,93 мм

Хорошую эффективность улавливания в случае *в)* можно объяснить тем, что кинетической энергии, набранной прохождением частицы вдоль профиля рассекателя, хватит для прохождения ПК, потерять в ПК энергию и ссыпаться за счет силы тяжести в золовый бункер.

При *а)* (рисунок 4.14) и *д)* результаты были получены неудовлетворительные. Отсутствие ПК приводило либо к тому, что частицы на скорости 60,8 м/с движутся

напрямую к стенке бункера, в связи с чем может происходить повышенный абразивный износ поверхности, либо большая часть частиц двигались в сторону выхода. Элемент ПК необходим для улучшения качества ИВЗ, так как его наличие улучшает показатель качества улавливания установки на 30 % от варианта *д)*.

4.3.2. Влияние высоты рассекателя на эффективность улавливания установки

Рассекатель, разные высоты которого изображены на рисунке 4.16, – очень важный элемент ИВЗ. Благодаря ему достигается реламиниризация потока. Если его высота невелика, то до середины рассекателя вдоль установки, при больших градиентах скоростей не происходит сглаживание пульсаций. Увеличение высоты рассекателя приводит к сглаживанию возможных пульсаций потока. Также высота важна для равномерного набора скорости частиц и их последующего инерционного отделения от несущей фазы.

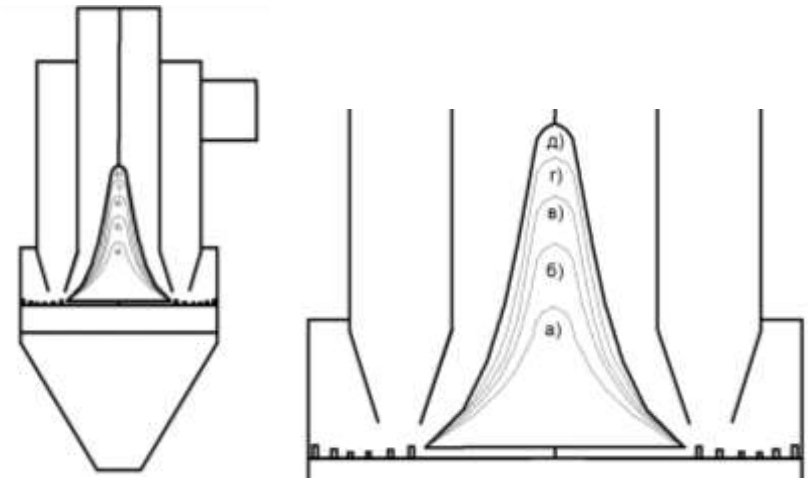


Рисунок 4.16 – Пять вариантов высоты рассекателя

Результаты численных экспериментов (рисунок 4.17) показывают, что высота рассекателя является важным элементом, от которого зависит эффективность установки в целом. От высоты рассекателя зависит, успеет ли поток, поступающий от входа, набрать необходимую скорость порядка 60 м/с и разделиться на два самостоятельных потока: золу и газ.

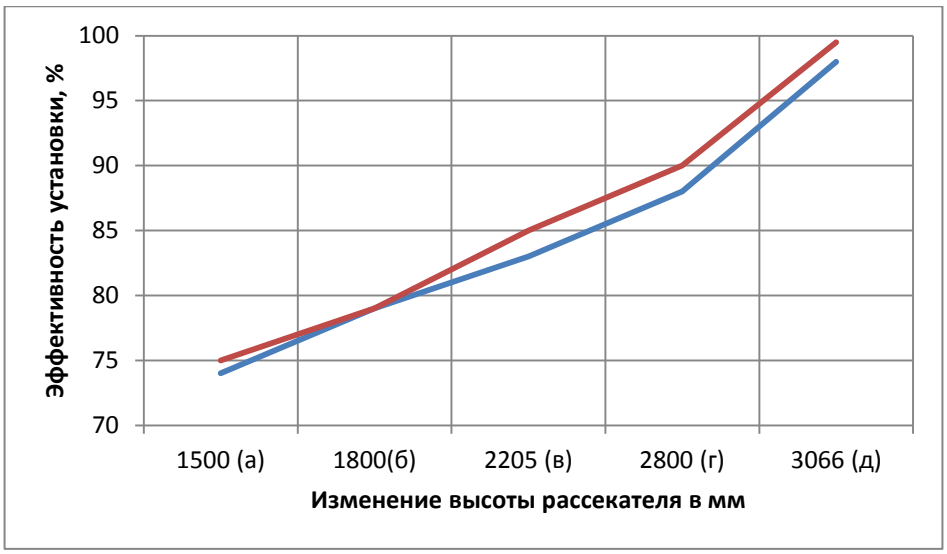


Рисунок 4.17 – Зависимость изменения высоты рассекателя от эффективности улавливания золы

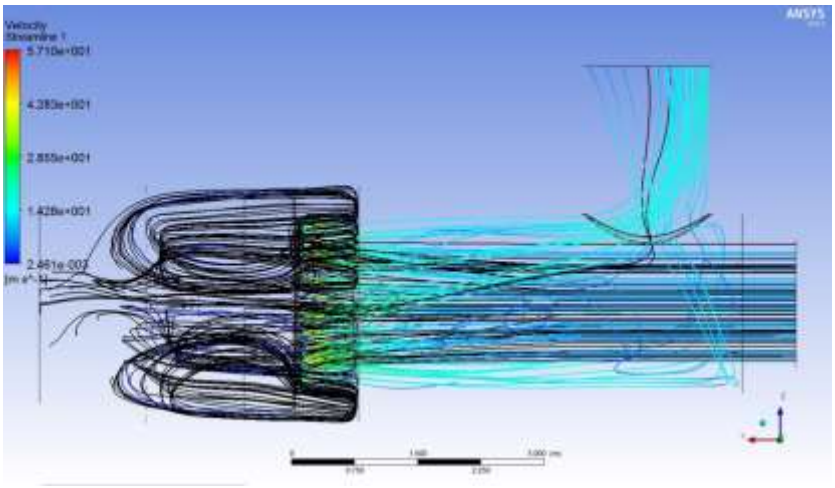


Рисунок 4.18 – Результаты при высоте направляющего аппарата в 3066 мм

По получившимся результатам можно сделать вывод о том, что высота рассекателя является немаловажным элементом, от которого зависит эффективность установки в целом (рисунок 4.18) [111].

4.3.3. Влияние высоты колец на эффективность улавливания установки

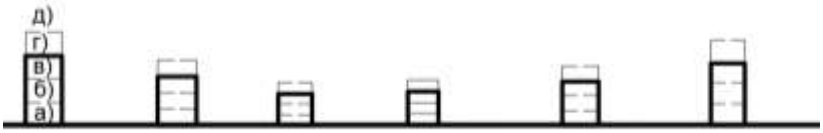


Рисунок 4.19 – Пять высот колец направляющего аппарата

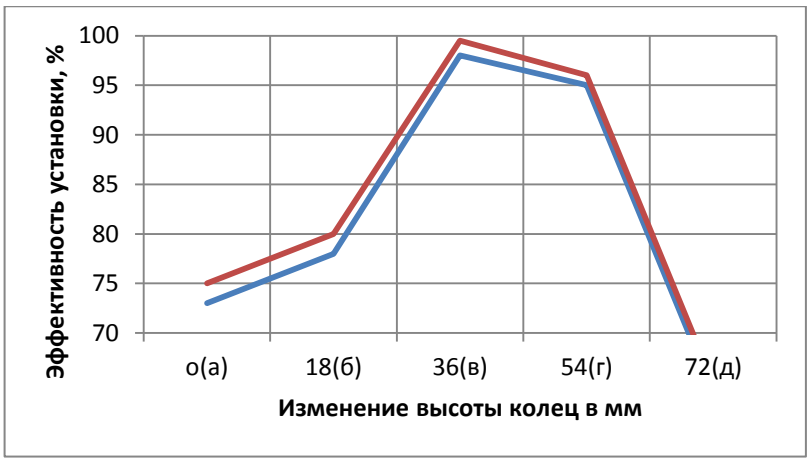


Рисунок 4.20 – Графическое представление зависимости эффективности установки от изменения высоты колец

Под буквами на графике (рисунок 4.19) представлено значение высоты крайних колец, последующие два меньше на 5 мм, и средние меньше еще на 5 мм. Всего колец на крестовине шесть. Они улучшают качество улавливания золы. От рассекателя и до стенки золоуловителя можно отметить сначала уменьшение высоты колец, а после отметки, соответствующей половине высоты свободной крестовины, – ее увеличение. Сделано это для того, чтобы частицы золы двигались вдоль этой изогнутой линии, а часть золы большего диаметра из общей массы, ударяясь об кольца, ссыпалась в бункер. Остальная часть золового потока увлекалась в зону ПК. Из-за потери кинетической энергии в ПК частица за счет силы тяжести опускалась в бункер. Недостаточная высота колец приводит к тому, что частицы, проходя входной патрубок, направятся в стенку установки. Исходя из этого, можно сделать вывод, что наличие колец необходимо [111, 62, 112].

4.3.4. Влияние высоты конфузорного участка на эффективность улавливания установки

В данной серии численных экспериментов проводилось изменение высоты конфузорного участка, показанного на рисунке 4.21.

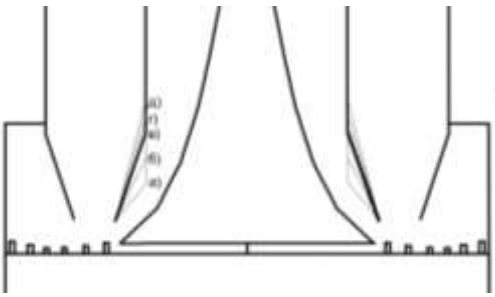


Рисунок 4.21 – Направление движения уходящих газов в ИВЗ второго поколения

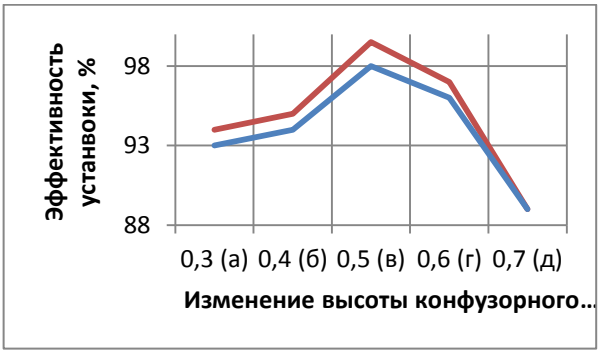


Рисунок 4.22 – Графическое представление зависимости эффективности установки от изменения высоты конфузорного участка

Из проведенных экспериментов (рисунок 4.22) можно сделать вывод о том, что конфузорный участок необходимо выполнять определенной высоты (0,5 м). При высоте участка, равной 0,7 м, поток набирает скорость, равную 52,9 м/с, что близко к скорости в 67 м/с, при которой происходит качественное улавливание. Скорость в 52 м/с поток развивает уже после разворота, а особенность сепарации заключается в достижении скорости около 67 м/с на конфузорном участке перед поворотом на выходной патрубок.

На рисунке 4.23 можно отметить скорость в 47 м/с, она такова перед поворотом, однако ее недостаточно для качественной очистки газа.

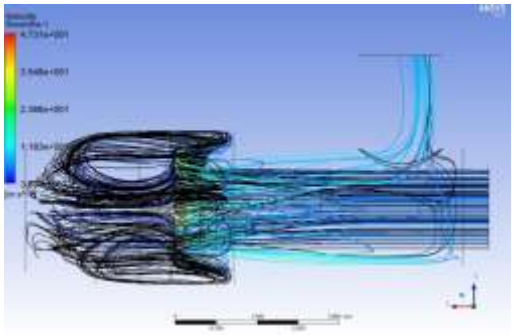


Рисунок 4.23 – ИВЗ второго поколения с конфузорным участком в 0,3 м

На рисунке 4.24 вариант высоты в 0,5 м, эффективность этой установки соответствует нормам СанПиН.

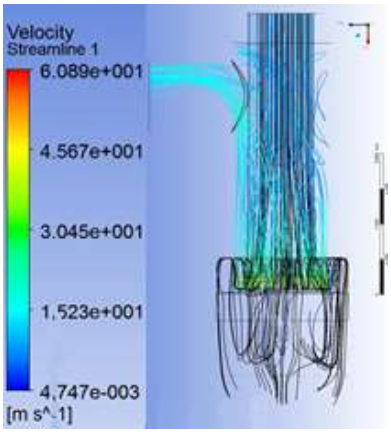


Рисунок 4.24 – ИВЗ второго поколения с конфузорным участком в 0,5 м

4.3.5. Осенесимметричность как свойство, нарушающее эффективность улавливания

На рисунке 4.25 жирной линией справа обозначена ось. Буквой *b* представлено расстояние для сдвига направляющего аппарата в сторону относительно оси.

В ходе испытаний были получены результаты, которые сведены в график на рисунке 4.26.

Исходя из результатов, можно сделать вывод, что зависимость этого влияния неоднозначна, нет стабильного улучшения показателей или ухудшения по мере увеличения сдвига. Любое изменение сечения на выходе из входной трубы приводит к тому, что распределение скоростей по ходу потока становится по обе стороны направляющего аппарата неодинаковым, что ведет к возникновению турбулентных пульсаций.

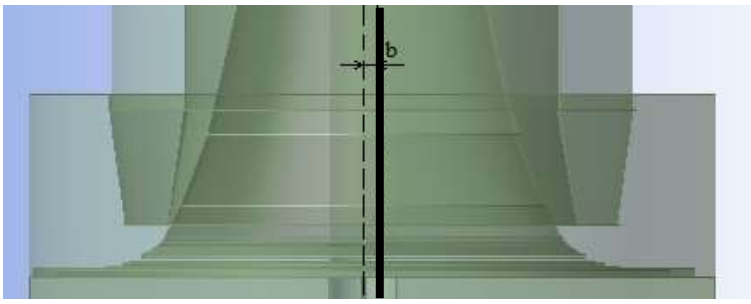


Рисунок 4.25 – Сдвиг направляющего аппарата от центральной оси на расстояние *b*

В ходе испытаний были выявлены результаты, которые сведены в их зависимость на рисунке 4.26.

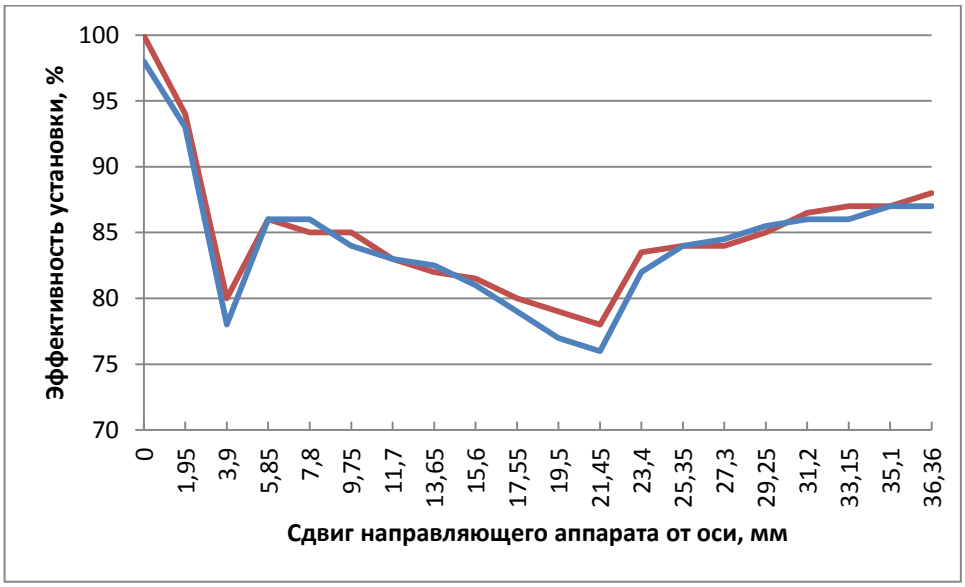


Рисунок 4.26 – График зависимости показателя сдвига на степень эффективности улавливания

На рисунке 4.27 показано движение потока при максимальном сдвиге в 36,36 мм, это отмасштабированный участок разворота потока с сепарацией частиц. Из цветовой градации можно отметить, что распределение скоростей происходит неравномерно, где сечение меньше, там скорости больше и очистка газа проходит лучше. В другом сечении тем временем скорости значительно снижаются и кинетической энергии частиц не хватает на отрыв их от газов. Поэтому та часть золы, что не успела набрать достаточное количество кинетической энергии по ходу движения потока между рассекателем и входным патрубком, увлекается уходящими газами на выход из установки.

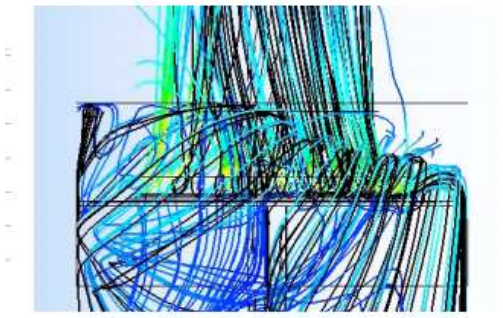


Рисунок 4.27 – Неравномерность улавливания золы при сдвиге в 36,36 мм

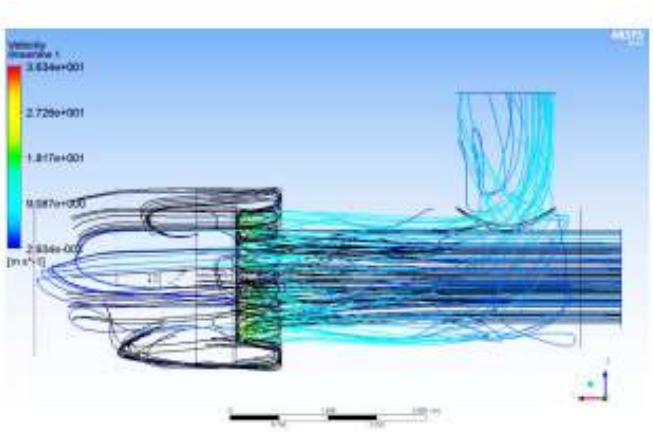


Рисунок 4.28 – Эффективность улавливания при сдвиге направляющего аппарата в 1,95 мм

Из рисунка 4.28 видно, что почти все частицы остались в бункере и лишь небольшая часть ушла неуловленной. Это происходило при сдвиге почти в 2 мм. Однако даже такой сдвиг приводит к ухудшениям показателей улавливания. Для лучшей работы необходимо производить жесткую фиксацию такого элемента, как направляющий аппарат, чтобы устранить подобные вариации сдвига.

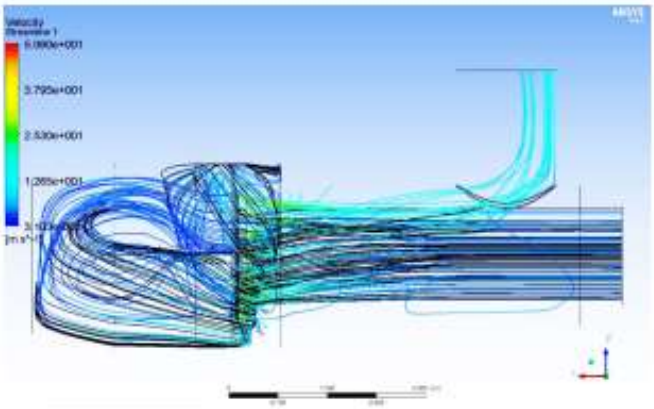


Рисунок 4.29 – Эффективность улавливания при сдвиге 36,36 мм

На рисунках 4.29 и 4.27 показано движение потока при максимальном сдвиге в 36,36 мм. На рисунке 4.27 отмасштабирован участок разворота потока и сепарации частиц. Из цветовой градации можно отметить, что распределение скоростей происходит неравномерно, где сечение уже, там скорости больше и очистка газа проходит лучше. В другом сечении тем временем скорости значительно снижаются и кинетической энергии частиц не хватает на отрыв от газов, из-за давления и малой скорости и под давлением дымососа они движутся на выход.

4.3.6. Влияние высоты входного патрубка на эффективность улавливания установки

Уменьшение высоты входного патрубка производилось в целях оценки эффективности установки и решении вопроса об экономии металла (в случае рисунка 4.30).

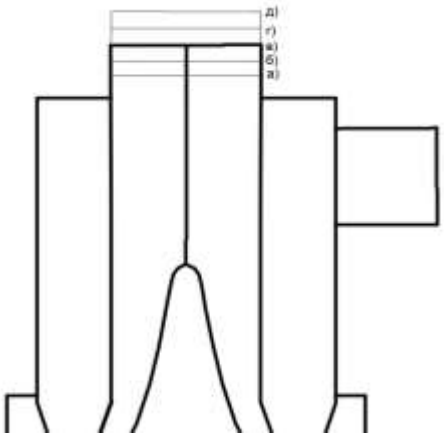


Рисунок 4.30 – Изменение высоты входного патрубка ИВЗ второго поколения

Результаты проведенных экспериментов сведены на рисунке 4.31.

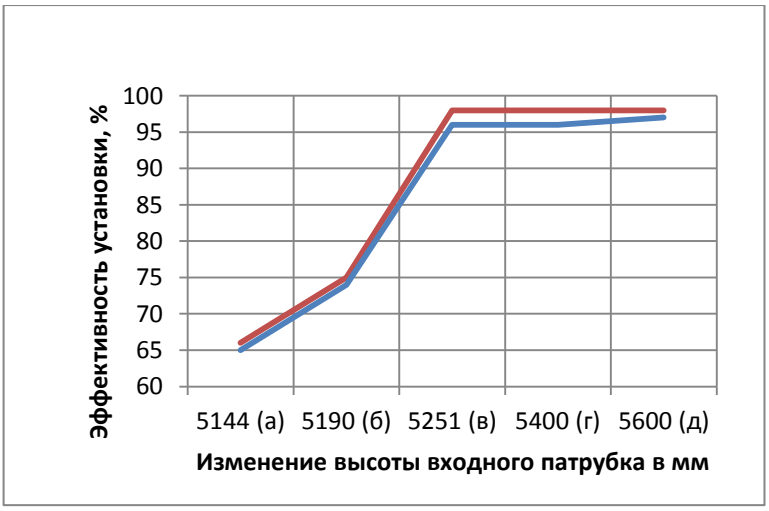


Рисунок 4.31 – Эффективность улавливания установки в зависимости от изменения высоты входного патрубка

Уменьшение трубы [104] в высоте на 450 мм ведет к падению эффективности улавливания на 33 %. Это происходит из-за того, что потоку не хватает расстояния, на котором он мог бы стабилизироваться, не создавалось бы излишних пульсаций на стенках, тем самым поток равномерно обтекал бы рассекатель.

В результате проведения численных исследований можно сделать вывод о том, что при высоком рассекателе и средней высоте трубы ИВЗ будет работать наиболее эффективно.

Затраты на металл, которые необходимо вложить в установку, оправданы высокой эффективностью.

Выводы к главе 4

Таким образом, в главе 4 были предприняты следующие этапы исследования:

1) проведен ряд численных экспериментов для установления необходимой геометрии ИВЗ по принципу работы антициклона;
2) оценено влияние исполнения обтекателя в виде секций на отклонение эффективности улавливания установки;
3) поиск необходимой геометрии проточной части сопровождался изменением высот отдельных геометрических параметров установки с последующим определением эффективности улавливания в каждом исследуемом случае;
4) рассчитан вариант, когда происходит сдвиг направляющего аппарата от оси. Это возможно из-за того, что конструкция рассекателя с крестовиной удерживается на тросе, который из-за неравномерного обтекания запыленным потоком смещается на некоторое расстояние от оси b;
5) после проведения натурного эксперимента расчетные граничные условия были скорректированы. По ним перерасчитаны полученные на графиках данные. Из-за отклонений по расчету эффективности улавливания от начальных расчетов теряется 2–3 %.

ГЛАВА 5. НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

5.1. Описание оборудования

В сентябре 2018 г. прошел натурный эксперимент на СП «ТЭЦ-4» АО «ТГК-11» города Омска. В эксперименте было задействовано следующее оборудование: гравиметрическая система «GRAVIMAT SHC-501», газоанализатор «Quintox KM 9106», пневмометрическая трубка Прандтля, многофункциональный дифманометр ДМЦ-01.

Переносная система GRAVIMAT SHC 500 (рисунок 5.1) предназначена для определения запыленности газовых потоков гравиметрическим методом. Она наиболее часто используется для проведения точной градуировки стационарных оптических пылемеров в единицах массовой концентрации, а также для проверки эффективности работы различных пылеуловителей и периодического измерения концентрации твердых частиц в газоходах. Модель SHC 501 отличается выводом текущей измерительной информации на дисплей прибора и видом датчика барометрического давления.

Прибор автоматически контролирует выполнение условия изокинетического отбора пробы и в случае необходимости корректирует скорость отбора пробы. Одновременно с отбором пробы система отбора пыли Gravimat SHC 500 моделей 501 и 502 проводит измерение основных параметров газопылевого потока (температура, относительное давление, скорость) для расчета объема отбираемой пробы и основных параметров окружающей среды (абсолютное давление, температура) для приведения значения объема к нормальным условиям.

Концентрация твердых частиц (мг/м^3) определяется как отношение массы пыли, отобранной на фильтр, к объему газа, прошедшего через фильтр.

Перечень возможностей системы GRAVIMAT SHC 500:

- высокая точность измерений, достигаемая за счет использования запатентованной конструкции пылесборника;

- гравиметрическое измерение запыленности в диапазоне от 0,1 до 50000 мг/м^3 (относительная погрешность при подобном измерении $\pm 8\%$).

С помощью пылеотборного устройства производится изокинетический отбор пробы запыленных газов. Пыль оседает на специальном фильтре. Массовая концентрация твердых частиц определяется путем взвешивания коллектора пыли с находящимся внутри него фильтром до и после проведения отбора пробы. Массовая концентрация пыли (мг/м^3) определяется как отношение массы пыли, осевшей на фильтре, к объему газа, прошедшего через фильтр.

С помощью компьютера и программы осуществляются ввод необходимых параметров и наблюдение за процедурой измерений, обработка и расчет параметров для изокинетического отбора пробы, согласованное управление отдельными стадиями измерений, ввод табличных данных, обработка данных, хранение всей измерительной информации; реализуются функции самодиагностики и помощи.

Рисунок 5.1 – GRAVIMAT SHC 500

Газоанализаторы переносные «Quintox» КМ 9106 (рисунок 5.2) предназначены для контроля содержания оксида углерода (CO), кислорода (O_2), оксида азота (NO), диоксида азота (NO_2), диоксида серы (SO_2), суммы углеводородов (СХНУ), диоксида углерода (CO_2) в промышленных выбросах, температуры окружающей среды, температуры и давления/разрежения в точке отбора пробы, а также для проверки, оперативной настройки и обслуживания котлов, газовых турбин, горелок и дизельных установок.

Газоанализаторы рассчитывают эффективность сжигания топлива на основании измерения следующих параметров: температуры окружающей среды, температуры отходящих газов, содержания кислорода.

При проведении тестирования прибор постоянно производит измерения параметров и обновление показаний дисплея. В случае необходимости проводить одновременно измерение параметров дымовых газов и давления в газоходе, необходимо использовать специальный зонд.

Отбор пробы осуществляется с помощью пробоотборного зонда с термопарой, фильтром твердых частиц и влагосборником. Газоанализатор имеет встроенный побудитель расхода.

Газоанализатор имеет микропроцессор, обеспечивающий проведение самотестирования, вывод информации о неисправностях, вход в главное меню. Управление работой газоанализатора осуществляется с помощью сенсорных кнопок, расположенных на выносном пульте управления прибора. Погрешность измерения прибора ± 5 %.

Рисунок 5.2 – Газоанализаторы переносные “Quintox” КМ 9106

Дифференциальные трубки (приемники пневмометрические) модификаций «Пито-Прандтля» и «Пито-прямая» [107] (далее – трубки) в комплекте с дифференциальными манометрами предназначены для определения объемного расхода газа по скорости в одной точке поперечного сечения цилиндрических труб

по методике, изложенной в ГОСТ 8.361–79 [108]. В комплекте с измерителями давления фирмы «Testo AG» трубки используются для определения скорости и объемного расхода газопылевых потоков в вентиляционных системах в диапазоне от 1 до 60 м/с.

Прибор ДМЦ-01 [109] (рисунок 5.3) предназначен для измерения давления, разрежения и разности давлений неагрессивных, негорючих газов. Прибор может применяться для контроля параметров общеобменной приточно-вытяжной вентиляции, расхода вредных выбросов производств, аэродинамических исследований и т. п.

Рисунок 5.3 – Манометр дифференциальный цифровой ДМЦ-01М с обработкой данных

Прибор выполняет следующие функции: установка нуля, измерение давления (разрежения), разности давлений, расчет локальных скоростей и объемного расхода газа с компенсацией по температуре потока, а также производит расчет средних скоростей и объемного расхода по точкам измерений.

К техническим характеристикам прибора можно отнести:

- диапазон измерений, Па (мм вод. ст.) 0...2000 (0…200);
- предел допускаемой дополнительной погрешности при отклонении температуры окружающего воздуха на каждые 5 ºС от нормальной (20 ± 5) ºС, Па или мм вод. ст., не более (0,1 + 0,001 Р) или (0,01 + 0,001 Р).

Скорость газа в общем виде рассчитывается по формуле:

$$w = \sqrt{\frac{2K_T \cdot \Delta P}{\rho}}, \quad (5.1)$$

где: w – скорость потока, м/с;

ΔP – динамическое давление, Па;

ρ – плотность среды при рабочих условиях, кг/м^3;

K_m – средний коэффициент преобразования трубки напорной по давлению (приведен в протоколе поверки).

5.2. Особенности проведения натурного эксперимента

Предлагаемая методика [110] может быть использована при испытаниях различного типа пылеуловителей других производств при условии, что температура, давление и концентрация загрязняющих компонентов очищаемых газов аналогичны таковым уходящих дымовых газов котлов или атмосферного воздуха.

Объем испытаний золоулавливающих установок обусловлен необходимостью определить следующие показатели работы золоулавливающей установки в целом или отдельных ее ступеней:

- степень очистки газов от твердых компонентов (золы);
- массовую концентрацию твердых компонентов в очищенных газах (остаточную запыленность);
- объемный расход и температуру очищенных газов;
- присосы внешнего воздуха в установку;
- аэродинамическое сопротивление установки;
- расход электроэнергии на работу установки, включая затраты на преодоление аэродинамического сопротивления.

Испытания проводятся при номинальной нагрузке (режиме работы) котла, если другие режимы не оговорены программой. Во время выполнения серии измерений (опыта) должны поддерживаться постоянными нагрузка котла и газовоздушный режим работы топки. На каждом режиме проводится не менее трех опытов.

Режим работы котла в период испытаний контролируется щитовыми эксплуатационными приборами. За 30 мин до начала опыта и во время его проведения с интервалом в 10 мин в журнале испытаний фиксируются:

- паропроизводительность котла;
- массовый расход пара промперегрева;
- давление и температура перегретого пара и пара до и после промперегревателя;
- давление и температура питательной воды;
- массовый расход продувочной воды;
- давление и температура продувочной воды;
- температура уходящих газов и холодного воздуха;
- барометрическое давление в период испытаний.

Последовательность проведения работ при подготовке к испытаниям золоулавливающих установок:

- составление рабочей программы, перечня подготовительных работ, графика проведения работ и утверждение их главным инженером ТЭС;
- выбор мерных сечений и подготовка эскизов для оборудования мест измерений площадками, штуцерами для пробоотборных устройств, подвода электропитания, вакуумной линии или линии сжатого воздуха;
- подготовка мерных сечений и выполнение других подготовительных работ;
- проверка:
  - состояния золоулавливающей установки и ее готовности к испытаниям;
  - эксплуатационных стационарных контрольно-измерительных приборов;
- установка и проверка переносных измерительных приборов и приспособлений;
- обучение наблюдателей и инструктаж по технике безопасности;
- проведение нескольких пробных измерений, в процессе которых проверяется работа измерительных приборов и приспособлений, выявляются особенности работы оборудования и режимов котла и т. п.

Измерительное сечение в газоходе выбирается в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.4.06, ГОСТ 17.2.4.07, ГОСТ Р 50820. Мерные сечения должны распо-

лагаться на прямолинейных, желательно вертикальных, участках газоходов постоянной конфигурации перед золоуловителями и после них. На этих участках не должно быть отложений золы. При использовании для измерений пневмометрических трубок и пылеотборных зондов нулевого типа длина прямолинейного участка постоянного сечения должна быть не менее четырех гидравлических диаметров газохода. Измерения проводятся в сечении, делящем участок в отношении 3:1 по направлению потока газа (рисунок 5.4).

При проведении натурного эксперимента технически было невозможно обойтись без погрешности, связанной с замерами на расстоянии четырех гидравлических диаметров, а также вносилась погрешность за счет относительной погрешности самих измерительных приборов. Лючки, в которых производились замеры и отборы проб, располагались, как указано на рисунке 5.5. Из-за хода запыленного потока по прототипу работы антициклона сложно без погрешности определить параметры запыленности и давления на выходе из установки.

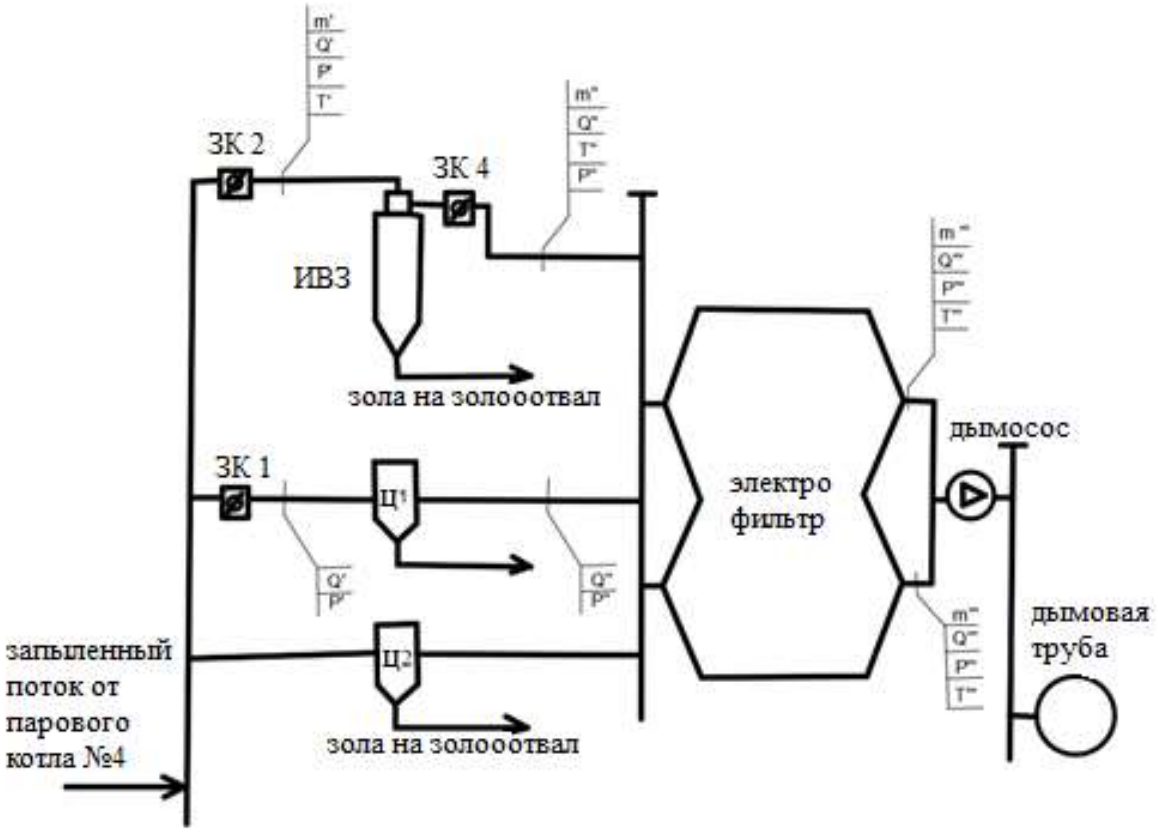


Рисунок 5.4 – Схема установки ИВЗ в газоочистном тракте

Рисунок 5.5 – Установка люков на входе и выходе золоуловителя

Данные, которые были получены в результате натурного эксперимента, приведены в таблице 5.1. Особенность полученных данных заключается в том, что рядом стоящий циклон, работающий с ИВЗ второго поколения на одном паровом котле ПК № 4, был открыт. Это значит, объемный расход уходящих газов, вырабатываемый котлом БКЗ-320, направлен на два золоулавливающих устройства.

Таблица 5.1 – Данные натурного эксперимента

№	Наименование показателей	Ед. из-мере-ния	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
1	Влага на рабочее состояние топлива	%	5,60	5,60	5,60	5,60
2	Зольность на рабочее состояние топлива	%	38,10	38,10	38,10	38,10
3	Общая сера на рабочее состояние топлива	%	0,66	0,66	0,66	0,66
4	Низшая теплота сгорания на рабочее состояние топлива	ккал/кг	4094	4094	4094	4094
5	Выход летучих на сухое беззольное состояние топлива	%	32,10	32,10	32,10	32,10
6	Содержание горючих в уносах	%	2,08	2,08	2,08	2,08
7	Содержание горючих в шлаке	%	2,5	2,5	2,5	2,5
8	Доля золы в уносах	–	0,95	0,95	0,95	0,95
9	Доля золы в шлаке	–	0,05	0,05	0,05	0,05
10	Производительность котла по паромеру	т/ч	200	200	200	200
11	Давление перегретого пара	кгс/см^2	140	140	140	140
12	Температура перегретого пара	°С	560	560	560	560
13	Содержание RO_2 за в/п	%	9,4	9,7	9,5	9,6
14	Содержание RO_2 за ДС	%	9,4	9,6	9,5	9,4
15	Содержание O_2 до ИВЗ	%	10,6	10,2	10,5	10,3
16	Содержание O_2 после ИВЗ	%	10,6	10,3	10,5	10,6
17	Содержание СО за ИВЗ	мг/нм^3	16	30	25	13
18	Температура уходящих газов за ВЗП	°С	138	138	138	138
19	Температура уходящих газов до ИВЗ	°С	118	114	112	118
20	Температура дымовых газов после ИВЗ	°С	120	114	108	118
21	Температура холодного воздуха до рециркуляции	°С	20	20	20	20
22	Температура питательной воды	°С	192,0	192,0	192,0	192,0
23	Давление питательной воды	кгс/см^2	197,0	197,0	197,0	197,0
24	Давление пара в барабане котла	кгс/см^2	146,0	146,0	146,0	146,0

Продолжение таблицы 5.1

№	Наименование показателей	Ед. из-мере-ния	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
25	Расход непрерывной продувки котла	т/ч	4,0	4,0	4,0	4,0
26	Барометрическое давление	гПа	1007	1006	1006	1005
27	Масса золы уловленной зондом после ЗУУ	г	2,4462	2,5979	1,6739	1,0335
28	Скорость дым. газов до ИВЗ	м/с	5,2	3,9	4,4	4,7
29	Скорость дым. газов после ИВЗ	м/с	6,1	4,4	4,9	5,2
30	Площадь сечения газохода до ИВЗ	$м^2$	1,95	1,95	1,95	1,95
31	Площадь сечения газохода после ИВЗ	$м^2$	1,77	1,77	1,77	1,77
32	Диаметр входного отверстия зонда	мм	5,2	6,4	6,4	5,2
33	Разрежение в топке котла	$кг/м^2$	4,0	4,0	4,0	4,0
34	Разрежение перед ИВЗ-01	гПа	7,38	7,11	7,16	8,1
35	Разрежение после ИВЗ-01	гПа	10,2	10,2	11,8	11,8
	I. ТОПЛИВО					
36	Содержание серы на рабочую массу	%	0,66	0,66	0,66	0,66
37	Сера (приведенная)	кг % /Мкал	0,16	0,16	0,16	0,16
38	Содержание влаги на рабочую массу	%	5,60	5,60	5,60	5,60
39	Влажность (приведенная)	кг % /Мкал	1,37	1,37	1,37	1,37
40	Содержание золы на рабочую массу	%	38,10	38,10	38,10	38,10
41	Зольность(приведенная)	кг % /Мкал	9,31	9,31	9,31	9,31
42	Калорийность	ккал/кг	4094	4094	4094	4094
43	Выход летучих веществ	%	32,10	32,10	32,10	32,10
44	Расход натурального топлива	т/ч	37,56	37,45	37,54	37,47
45	Расход условного топлива	т/ч	21,97	21,90	21,95	21,92
46	Испарительная способность топлива	кг/кг	5,71	5,72	5,71	5,72

Продолжение таблицы 5.1

№	Наименование показателей	Ед. измерения	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
47	Тепловое напряжение топочного объема	Мкал/м^3×ч	77,20	76,96	77,14	77,01
	II. ВОДА И ПАР					
48	Производительность котла по прибору	т/ч	200	200	200	200
49	Давление перегретого пара	кг/см^2	140	140	140	140
50	Давление перегретого пара	атм	141	141	141	141
51	Температура перегретого пара	°С	560	560	560	560
52	Удельный объем перегретого пара	м^3/кг	0,026	0,026	0,026	0,026
53	Поправка на $P_{пп}$ и $t_{пп}$	–	1,004	1,004	1,004	1,004
54	Расход пара с поправкой на $P_{пп}$ и $t_{пп}$	т/ч	201	201	201	201
55	Расход пара с поправкой на $t_{пв}$	т/ч	214	214	214	214
56	Давление питательной воды	кг/см^2	197	197	197	197
57	Давление питательной воды	ата	198	198	198	198
58	Температура питательной воды	°С	192	192	192	192
59	Расход непрерывной продувки	т/ч	4,0	4,0	4,0	4,0
60	Давление пара в барабане	кг/см^2	146	146	146	146
61	Давление пара в барабане	ата	147	147	147	147
62	Теплосодержание перегретого пара	ккал/кг	833,08	833,08	833,08	833,08
63	Теплосодержание питательной воды	ккал/кг	197,06	197,06	197,06	197,06
64	Теплосодержание котловой воды	ккал/кг	378,98	378,98	378,98	378,98
65	Тепло, полезно используемое котлом	Гкал/ч	137,08	137,08	137,08	137,08
	III. ДЫМОВЫЕ ГАЗЫ					
66	Содержание RO_2 за в/п (до ЗУУ)	%	9,4	9,7	9,5	9,6
67	Содержание O_2 за в/п (до ЗУУ)	%	10,6	10,2	10,5	10,3
68	Избыток воздуха за в/п (до ЗУУ)	–	1,92	1,84	1,9	1,86
69	Содержание RO_2 за ДС (после ЗУУ)	%	9,4	9,6	9,5	9,4
70	Содержание O_2 за ДС (после ЗУУ)	%	10,6	10,3	10,5	10,6
71	Содержание СО за ДС	мг/нм^3	16	30	25	13
72	Избыток воздуха за ИВЗ	–	1,92	1,86	1,90	1,92
73	Присосы воздуха на участке в/п – дс	%	0,5	1,6	0,3	5,9

Продолжение таблицы 5.1

№	Наименование показателей	Ед. измерения	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
74	Температура уходящих газов (до ЗУУ)	°С	138	138	138	138
75	Температура дымовых газов после ИВЗ	°С	120	114	108	118
76	Разрежение в топке	кг/м^2	4,0	4,0	4,0	4,0
77	Удельный объем дымовых газов перед ЗУУ	нм^3/кг	9,2	8,8	9,1	8,9
78	Удельный объем дымовых газов после ЗУУ	нм^3/кг	9,2	8,9	9,1	9,2
79	Удельный объем дымовых (при a = 1)	нм^3/кг	4,9	4,9	4,9	4,9
80	Теоретически необходимый расход воздуха при н. у.	нм^3/кг	4,57	4,57	4,57	4,57
81	Общий объемный расход дымовых газов до ЗУУ	тыс.м^3/ч	525,49	505,18	520,57	511,15
82	Общий объемный расход дымовых газов до ЗУУ	тыс.нм^3/ч	344,44	330,89	340,95	334,13
83	Объемный расход дымовых газов перед ИВЗ	тыс.м^3/ч	36,50	27,38	30,89	32,99
84	Объемный расход дымовых газов перед ИВЗ	тыс.нм^3/ч	24,95	18,99	21,72	22,59
85	Объемный расход дымовых газов после ИВЗ	тыс. нм^3/ч	38,87	28,04	31,22	33,13
86	Объемный расход дымовых газов после ИВЗ при н. у.	тыс.нм^3/ч	26,61	19,19	21,38	22,68
87	Количество золы на входе ЗУУ	кг/ч	13885,41	13841,26	13874,51	13850,65
88	Количество золы на входе в ИВЗ	кг/ч	1011,16	786,92	863,68	939,77
89	Количество золы на выходе из ИВЗ	кг/ч	566,02	402,13	261,17	244,20
90	Количество золы на выходе ЗУУ	г/с	157,23	111,7	72,55	67,83
91	Степень очистки дымовых газов	%	44,02	48,90	69,76	74,01
92	Запыленность дымовых газов до ЗУУ при н. у.	г/нм^3	40,31	41,83	40,69	41,45
93	Запыленность дымовых газов после ЗУУ при н. у.	г/нм^3	21,27	20,95	12,22	10,77
94	Отобранный объем дымовых газов при н. у.	нм^3	0,115	0,124	0,137	0,096

Окончание таблицы 5.1

№	Наименование показателей	Ед. измерения	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
	IV. ВОЗДУХ					
95	Температура холодного воздуха до рециркуляции	°С	20	20	20	20
96	Барометрическое давление	гПа	1007	1006	1006	1005
	V. ОЧАГОВЫЕ ОСТАТКИ					
97	Содержание горючих в уносе	%	2,1	2,1	2,1	2,1
98	Содержание горючих в шлаке	%	2,5	2,5	2,5	2,5
	VI. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС					
99	Потери тепла с уходящими газами (q_2)	%	8,70	8,41	8,63	8,48
100	Потери тепла с хим. недожогом (q_3)	%	0,010	0,018	0,015	0,008
101	Потери тепла с мех. недожогом (q_4)	%	1,56	1,56	1,56	1,56
102	Потери тепла в окружающую среду (q_5)	%	0,60	0,60	0,60	0,60
103	Сумма потерь тепла	%	10,87	10,58	10,80	10,64
104	КПД «брутто» котла по обр. балансу	%	89,1	89,1	89,2	89,4

Данные натурного эксперимента (таблицы 5.1–5.2) были получены при проведении опытов при положении рассекателя на отметках, как показано на рисунке 5.6. Чем выше поднимали рассекатель, тем больше становилось сопротивление установки и тем меньше объемный расход уходящих газов.

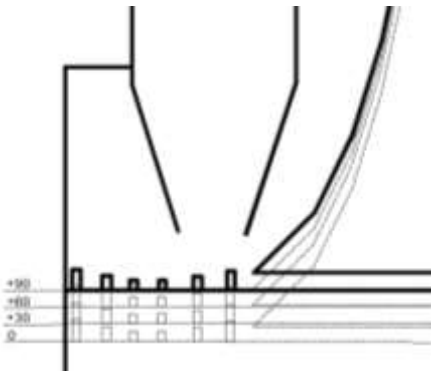


Рисунок 5.6 – Четыре отметки для проведения натурного эксперимента

Таблица 5.2 – Данные натурного эксперимента

(Н. Э. – натурный эксперимент, Ч. Э. – численный эксперимент)

№	Наименование показателей	Ед. измерения	Опыт 1 (0)		Опыт 2 (+30)		Опыт 3 (+60)		Опыт 4 (+90)	
			Н. Э.	Ч. Э.	Н. Э.	Ч. Э.	Н. Э.	Ч. Э.	Н. Э.	Ч. Э.
1	Сопротивление ИВЗ-1	Па	365	368	288	295	187	202	368	375
2	Объемный расход дым. газов перед ИВЗ-1	тыс. $м^3$/ч	42,485	42,485	28,323	28,323	23,072	23,072	24,345	24,345
3	Скорость дымовых газов на конфузорном участке при расходе на входе в ИВЗ-1	м/с	36,9	38	36,2	39	57,2	58	96,6	98
4	Эффективность ИВЗ-1	%	44,02	45	48,90	50	69,76	65	74,01	75

В ходе промышленных испытаний установка не достигла значения эффективности в 99 %. Это связано с тем, что паровой котел БКЗ-320, за которым установлен ИВЗ, работает в аварийном режиме. Котел не может выйти на номинальную производительность. В связи с этим не может выделиться проектное количество дымовых газов 150 тыс. $м^3$/ч. В испытаниях через ИВЗ второго поколения прошли объемные расходы, равные 20–43 тыс. $м^3$/ч. Дополнительные перемещения направляющего аппарата в вертикальной плоскости могли увеличить эффективность улавливания установки. В натурном эксперименте скорости на конфузорном участке были рассчитаны вручную. При подобных обстоятельствах проведения эксперимента условия реламиниризации достигнуты не были.

5.3. Обсуждение результатов испытаний

После проведения натурного эксперимента необходимо установить соответствие численного эксперимента и натурных испытаний. Отклонения данных

в основном объясняются не погрешностями измерений, а различием в поверхностных условиях. Эти отклонения лежат в пределах ±35 %.

Особенностью установки, выявленной в результате проведения натурного эксперимента, является относительно низкое аэродинамическое сопротивление. Это вызвано возникновением реламиниризации. Оно не учитывается в ANSYS CFX.

Реламиниризация [111–116] – это явление обратного перехода турбулентного течения в ламинарное. Она связана с особыми характеристиками течения газа, при которых резко падает интенсивность теплообмена. Причем это наблюдалось при сверхзвуковых режимах течения, где числа Рейнольдса Re значительно превышали границу существования турбулентных течений. На сегодняшний день это явление слабо изучено, но некоторое обоснование было представлено в [115].

Снижение интенсивности процесса теплообмена в устройствах в данной работе не рассматривается. Но само явление обусловило изучение течения запыленного потока в новых золоуловителях, где реламиниризация позволяет значительно снизить или даже убрать поперечные пульсации потока, а значит и золовых частиц в пограничном слое. Это дало бы возможность сконструировать такое устройство золоулавливания, где с большой вероятностью основная масса частиц (95 % и более) не уносилась в уходящий газовый поток, а также снижало бы аэродинамическое сопротивление установки.

В [116] показано, что переход турбулентного пограничного слоя в ламинарный экспериментально наблюдается в сильно конфузорных течениях жидкости и газа при отрицательных градиентах течения и при относительно небольшой шероховатости стенки.

В [115] подчеркивается, что переход возможен при ускорениях потока, что наблюдается в конфузорных каналах и при отрицательном градиенте давления.

Все перечисленные условия осуществления перехода из турбулентного потока в ламинарный на небольших участках течения имеют место быть в проточной части ИВЗ. При этом возникает вопрос: при каких характеристиках течения и геометрии проточной части золоуловителя можно осуществить этот переход.

На поставленный вопрос можно ответить, руководствуясь рекомендациями [115]. Однако использовать понятия толщины пограничного слоя δ не представляется возможным по определению, так как толщина пограничного слоя определяется там, где скорость невозмущенного потока составляет 99 % от скорости вдали от пограничного слоя. Теоретически же толщина пограничного слоя равна бесконечности. Поэтому рекомендации предлагают воспользоваться понятиями: толщина вытеснения δ_1 и толщина потери импульса δ_2.

Толщина вытеснения определяется как:

$$\delta_1 = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u\rho}{u_\infty \rho_\infty}\right) dy, \tag{5.2}$$

Толщина потери импульса

$$\delta_2 = \int_0^{\infty} \frac{u\rho}{u_\infty \rho_\infty} \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right) dy, \tag{5.3}$$

Здесь индекс «∞» обозначает бесконечность, а u и ρ, соответственно, скорость и плотность газового потока.

По полученным данным, из расчетного эксперимента имеем: скорость на выходе из сопла u = 67 м/с, кинематическая вязкость газов $\nu = 26{,}2 \cdot 10^{-6}$ м^2/с, тогда на отрезке рассекателя в 2 м перед выходом получаем число Рейнольдса Re_x, равное $5{,}11 \cdot 10^6$, что говорит о развитом турбулентном течении. Проанализируем условия возникновения реламиниризации. По экспериментальным данным [112,113], утверждается, что начальное значения числа $Re_{\delta 2}$, полученного по толщине потери импульса, составляло от 500 до 2000, что определяло резкий обратный переход в ламинарный режим с полным исчезновением турбулентности. При этом комплекс $(\nu/u_{2\infty}) \cdot (du_\infty/dx)$ достигает значения: $(3 \div 4) \cdot 10^{-6}$.

Расчет для $Re_{\delta 2\ крит}$ показывает:

$\mathrm{Re}_{\delta_{2крит}} = \dfrac{u \cdot \delta_2}{\upsilon} = \dfrac{67 \cdot 5{,}87 \cdot 10^{-4}}{26{,}2 \cdot 10^{-6}} = 1501,$ что говорит о соблюдения вышеназванного условия при этом

$$\delta_2 = 0{,}664 \cdot \sqrt{\upsilon x / u_\infty} = 0{,}664 \cdot \sqrt{26{,}2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{2}{67} = 5{,}87 \cdot 10^{-4}.$$

Осталось убедиться, что и комплекс $\left(\nu / u^2{}_\infty\right)\cdot\left(du_\infty / dx\right)$ в данной работе также соответствует условиям перехода турбулентного течения в ламинарное.

Для этого определимся с участком, на котором явление реламиниризации позволит наиболее эффективно устранить турбулентные пульсации. Безусловно, этот участок прилегает к выходному сечению для газового потока и находится на небольшом расстоянии от него. Рассмотрим участки конфузора с длиной 5–15 см (таблица 5.3). Расчеты показывают, что для данных участков от 5 до 15 см с шагом 0,025 комплекс изменяется в соответствии с таблицей 5.3.

Таблица 5.3 – Изменение комплекса в зависимости от протяженности участка

Длина участка	0,05	0,06	0,075	0,08	0,1	0,12	0,125	0,15
Значение комплекса 10^{-6}	6,3	5,25	4,2	3,94	3,15	2,625	2,52	2,1

Таким образом, получены результаты расчета, при анализе которых можно сказать, что длина участка перед выходом из сопла лежит в пределах 8–10 см.

К сожалению, этих данных недостаточно для того, чтобы рассчитать геометрические характеристики всего аппарата в целом, так как на процесс течения оказывают влияние его многочисленные параметры и конфигурация проточной части золоуловителя, которые нельзя получить на основе представленных анализов. Данные расчеты лишь показывают, что процесс реламиниризации присутствует и это дает уверенность, что аппарат будет работать более эффективно в условиях отсутствия турбулентных пульсаций.

До этого момента реламиниризация была рассчитана без натурного эксперимента, сейчас же требуется рассчитать: могло ли существовать явление реламиниризации на участке золоуловителя при тех условиях, которые были вычислены лабораторным оборудованием. Поэтому необходимо проводить численные экспериментальные исследования для учета всех особенностей течения газового потока с золовыми частицами. Для этого определим число Рейнольдса $Re_{\delta 2}$ по толщине потери импульса и комплекс $(\nu/u)\ (du/dx)_{2\infty}$. При этом ΔU может меняться от трех ближайших целых значений при 30 м/с и до шести при 220 м/с, так как эти значения лежат в области существования явления реламиниризации по значению комплекса $(\nu/u)\ (du/dx)_{2\infty}$.

Таблица 5.4 – Рассчитанные данные по числу Рейнольдса на испытуемом участке для определения наличия реламиниризации вдоль профиля направляющего аппарата

	Скорость на выходе, м/с	Значение комплекса 10^{-6}	Толщина потери импульса δ_2 10^{-4}, м	Число $Re_{\delta 2}$
Циклон открыт	36	1,29	10,9	1498
	36,2	1,29	10,9	1500
	57,2	0,34	5	1090
	96,6	0,546	8,17	3012

Во всех случаях режим течения турбулентный.

Анализ таблицы показывает, что ни в одном из случаев не выполняется условие реламиниризации потока, что не дает возможности эффективно уловить частицы.

Анализ результатов испытания указывает на большие погрешности в определении расхода, что позволяет говорить о наличии присосов воздуха в аппарат, либо через чайник либо через монтажные люки, что категорически не допускается, так как существенно влияет на степень улавливания. Данные, которые использовались в расчете реламиниризации, приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Данные скоростей при максимально удовлетворяющих численным экспериментам условий по натурному эксперименту

Состояние циклона	№ опыта	Граничные условия	Скорость на необходимом участке, м/с
Циклон открыт	1	Давление на входе –давление на выходе	9,22
		Давление на входе – скорость на выходе	13,53
		Массовый расход на входе – давление на выходе	8,48
	2	Давление на входе –давление на выходе	1,85
		Давление на входе – скорость на выходе	16,34
		Массовый расход на входе – давление на выходе	5,89
	3	Давление на входе –давление на выходе	4,23
		Давление на входе – скорость на выходе	21,47
		Массовый расход на входе – давление на выходе	3,76
	4	Давление на входе – давление на выходе	3,98
		Давление на входе – скорость на выходе	19,42
		Массовый расход на входе – давление на выходе	5,12

В таблицах 5.6–5.9 была рассчитана установка по различным граничным условиям. Лучше всего соответствовали натурному эксперименту граничные условия: массовый расход на входе и давление на выходе, давление на входе и давление на выходе.

Таблица 5.6 – Данные натурного и численного экспериментов: опыт № 1 при открытом циклоне

№ п/п	Наименование параметров	Ед. измерения	Опыт № 1				
			Давление на входе – давление на выходе	Масс. расход на входе – давление на выходе	Масс. расход на входе – скорость на выходе	Давление на входе – скорость на выходе	Натурный эксперимент
1	Сопротивление ИВЗ-1	Па	440	630	–	1477	365
2	Массовый расход дым. газов перед ИВЗ-1	кг/с	12,31	14,45	–	21,896	14,45
3	Массовый расход дым. газов после ИВЗ-1	кг/с	12,254	14,4629	–	21,902	12,03
4	Скорость дымовых газов на конфузорном участке при расходе на входе в ИВЗ-1	м/с	15,49	21	–	27,49	36
5	Эффективность ИВЗ-1	%	70	50	–	60	44,22
6	Давление на входе в ИВЗ	Па	100000	100600	–	100000	100000
7	Давление на выходе в ИВЗ	Па	99560	99970	–	98729,6	99635,3

Таблица 5.7 – Данные натурного и численного экспериментов: опыт № 2 при открытом циклоне

№ п/п	Наименование параметров	Ед. измерения	Опыт № 2				
			Давление на входе – давление на выходе	Масс. расход на входе – давление на выходе	Масс. расход на входе – скорость на выходе	Давление на входе – скорость на выходе	Натурный эксперимент
1	Сопротивление ИВЗ-1	Па	260	400	638500	2380	289
2	Массовый расход дым. газов перед ИВЗ-1	кг/с	8,71065	9,64	9,64	22,1957	9,64
3	Массовый расход дым. газов после ИВЗ-1	кг/с	8,71104	9,63768	0,926876	22,1858	12,24
4	Скорость дымовых газов на конфузорном участке при расходе на входе в ИВЗ-1	м/с	14,5	15,57	5,7	36	36,2
5	Эффективность ИВЗ-1	%	82	60	60	50	44,78
6	Давление на входе в ИВЗ	Па	100000	100400	757700	100000	100000
7	Давление на выходе в ИВЗ	Па	99740	100000	119200	97620	99711,5

Таблица 5.8 – Данные натурного и численного экспериментов: опыт № 3 при открытом циклоне

№ п/п	Наименование параметров	Ед. измерения	Опыт № 3				
			Давление на входе – давление на выходе	Масс. расход на входе – давление на выходе	Масс. расход на входе – скорость на выходе	Давление на входе – скорость на выходе	Натурный эксперимент
1	Сопротивление ИВЗ-1	Па	180	400	2401	3670	186
2	Массовый расход дым. газов перед ИВЗ-1	кг/с	5,786	7,85	7,85	22,6108	7,85
3	Массовый расход дым. газов после ИВЗ-1	кг/с	5,5806	7,85087	11,5877	22,6108	12,495
4	Скорость дымовых газов на конфузорном участке при расходе на входе в ИВЗ-1	м/с	12,4	17	37,3	50	57,2
5	Эффективность ИВЗ-1	%	70	85	80	80	67,79
6	Давление на входе в ИВЗ	Па	100000	100400	2253	100100	100000
7	Давление на выходе в ИВЗ	Па	99820	100000	–148	96430	99813,3

Таблица 5.9 – Данные натурного и численного экспериментов: опыт № 4 при открытом циклоне

№ п/п	Наименование параметров	Ед. измерения	Опыт № 4				
			Давление на входе – давление на выходе	Масс. расход на входе – давление на выходе	Масс. расход на входе – скорость на выходе	Давление на входе – скорость на выходе	Натурный эксперимент
1	Сопротивление ИВЗ-1	Па	340	560	3313	5255	368
2	Массовый расход дым. газов перед ИВЗ-1	кг/с	6,38	8,28	8,28	21,44	8,28
3	Массовый расход дым. газов после ИВЗ-1	кг/с	6,25	8,2882	11,0496	21,4414	11,912
4	Скорость дымовых газов на конфузорном участке при расходе на входе в ИВЗ-1	м/с	17,9	23,5	50,2	61,88	96,6
5	Эффективность ИВЗ-1	%	70	90	40	90	71,49
6	Давление на входе в ИВЗ	Па	100000	100590	3183	100041	100000
7	Давление на выходе	Па	99660	99930	–130	94785,4	99631,8

	в ИВЗ						

Скорость потока на входе вычислена из формулы $Q = wf$, где w – скорость, м/с; Q – объемный расход газов, м^3/с, f – площадь проходного сечения, м^2. Массовый расход вычислен переводом относительно заданного объемного расхода газов. Все остальные параметры вычислены с помощью численного эксперимента.

После выбора лучших граничных условий было необходимо оценить, как изменяющийся объемный расход газов будет влиять на эффективность улавливания золы в ИВЗ. При граничных условиях «давление на входе – давление на выходе» сложно фиксировать объемный расход уходящих газов, а «массовый расход на входе – давление на выходе» это позволяет сделать. Дополнительно в граничные условия внесем распределение дисперсного состава частиц относительно их массовой и количественной концентрации в таблицу 5.10.

Таблица 5.10 – Дисперсный состав золы экибастузского угля, вносимый в ANSYS CFX

Диаметр частиц золы, мкм	Количественное соотношение частиц на 100 частиц	Массовое содержание частиц
1	2	0,000006
2	5	0,000049
3	8	0,00017
4	10	0,00004
5	25	0,0008
10	15	0,006
15	14	0,021
20	10	0,049
25	5	0,096
30	3	0,167
35	2	0,264
40	1	0,395

В таблице 5.11 приведено влияние изменения объемных расходов газа на рабочие параметры установки. Значения в ней рассчитаны по верифицированным по натурному эксперименту граничным условиям. На основании табличных данных можно сделать вывод о том, что достижение высокой эффективности улавливания на ИВЗ второго поколения возможно в диапазоне изменения объемного расхода от 110000–150000 м^3/ч. Однако при увеличении объемного расхода газов увеличивается аэродинамическое сопротивление установки. Подобное можно проверить лишь

натурным экспериментом. Он покажет наличие явления реламиниризации, позволяющее снизить аэродинамическое сопротивление установки, что в конечном итоге позволит оставить существующие дымососы на котле. Эффективность ИВЗ при снижении аэродинамического сопротивления установки не меняется.

Таблица 5.11 – Влияние изменения расхода на рабочие параметры ИВЗ

№ п/п / Расчетные параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Объемный расход газов, тыс. $м^3$/ч	30,00	40,00	60,00	80,00	100,00	110,00	120,00	130,00	140,00	150,00
Массовый расход газов, кг/с	10,21	13,61	20,42	27,22	34,03	37,43	40,83	44,24	47,64	51,047
Массовый расход частиц, кг/с	0,58	0,778	1,17	1,56	1,94	2,14	2,33	2,53	2,72	2,927
Перепад давления на ИВЗ, Па	296,7	482	620	842	1050	1200	1326	1503	1720	2010
Эффективность улавливания, %	75	52,06	48,72	69,23	68,3	90,65	88,63	74,51	84,43	93,7
Скорость потока на входе, м/с	4,72	6,29	9,44	12,58	15,73	17,3	18,87	20,45	22,02	23,59
Максимальная скорость на конфузорном участке, м/с	36	40	44	58	65	78	86	92	96	102

5.4. Рекомендации по продолжению работы с ИВЗ

Последующая работа с ИВЗ состоит в изменении положения направляющего аппарата относительно отметки его начального положения. Смещение должно производится за счет перемещения обтекателя на тросе вниз на 1 см. В каждом опыте будет найдена эффективность улавливания золы, объемный расход газов и аэродинамическое сопротивление аппарата. Это необходимо для того, чтобы обнаружить наличие явления реламиниризации на отдельных участках. Для этого построены монтажно-настроечные таблицы, в которых установлена взаимосвязь скорости в средней части конфузорного участка на число Рейнольдса. Если значение числа Рейнольдса, вычисленного по толщине потери импульса, попадает

в область 500–2000, значит произошла реламиниризация потока. В таком случае удастся зафиксировать уменьшенное сопротивление установки.

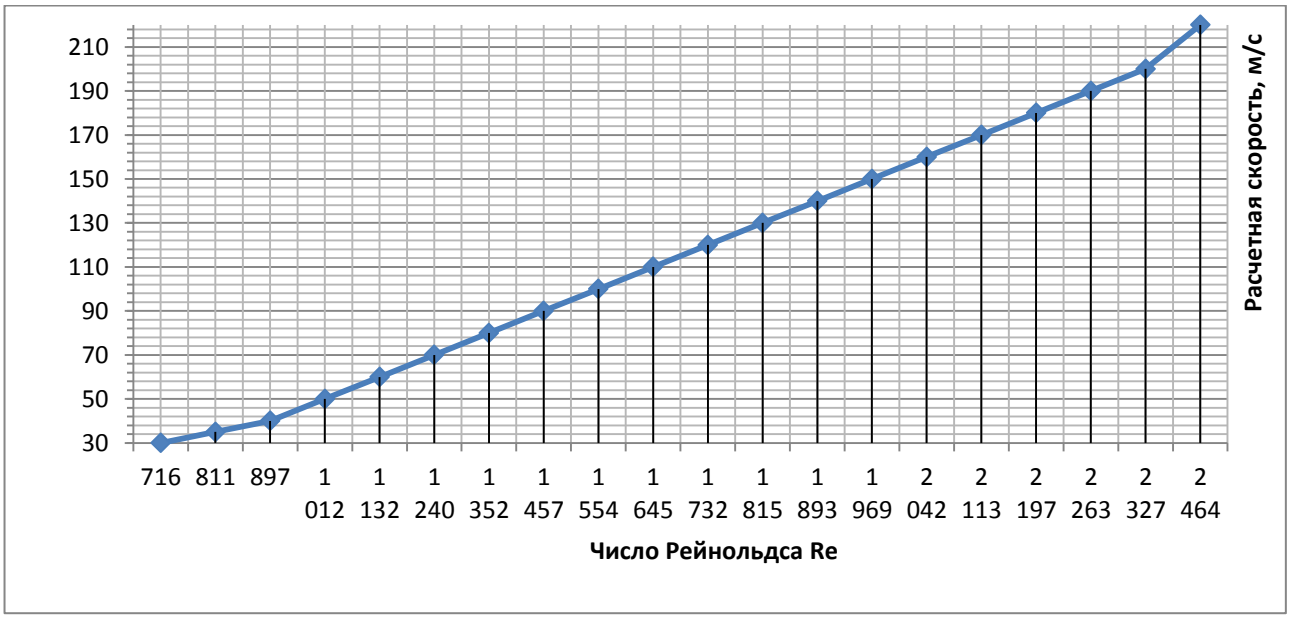


Рисунок 5.7 – Монтажно-настроечная таблица

После этого численными экспериментами необходимо достигнуть сходства результатов, рассчитать погрешность, возникающую из-за сетки в каждом подобном 1 см спуска; также нужна последующая оценка необходимости проведения экспериментов с ИВЗ (рисунок 5.6)

Выводы к главе 5

В главе 5 проведен анализ численных экспериментов, которые позволяют уточнить граничные условия для последующих численных экспериментов; дано пояснение явления реламиниризации в ее соотношении с процессом движения запыленного потока в золоуловителе – ранее реламиниризация упоминалась только в процессах, связанных с теплообменом при сверхзвуковых течениях, в диссертациях и публикациях начала XX века; представлена таблица 5.11 с объемными расходами, при которых достигается наибольшая эффективность. Из подобной таблицы можно сделать вывод о том, что достижение высокой эффективности

улавливания на ИВЗ возможно в диапазоне изменения объемного расхода от 110 000–150 000 м^3/ч. Однако при увеличении объемного расхода газов увеличивается аэродинамическое сопротивление установки, но подобное проверить можно лишь натурным экспериментом. Он покажет наличие явления реламинаризации, снижающего аэродинамическое сопротивление установки, что в конечном счете позволит оставить существующие дымососы на котле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем диссертационном исследовании был проведен подробный анализ пылеулавливающих установок; с помощью обзора литературы выявлены перспективные модели аппаратов для дальнейшей проверки лучших из них расчетно-экспериментальным путем. Проведено расчетно-экспериментальное моделирование запыленного потока в выбранном для исследования аппарате, ИВЗ, при 200 различных вариациях геометрической формы, выявлена геометрия золоулавливающего аппарата, которая может достичь степени улавливания золы порядка 99,5 %.

1. Для достижения данного результата на основании многих численных экспериментов установлены зависимости степени улавливания золы от геометрических размеров аппарата и от его элементов, просчитаны конструктивные решения установки. Это позволило без дополнительного технического оснащения достичь максимальной эффективности улавливания частиц, а именно:

- большой вклад в эффективность аппарата внес установленный рассекатель, который увеличил ее на 25 %;
- добавка в 29 % была достигнута с учетом ПК и модернизации рассекателя до принципа направляющего аппарата;
- общая эффективность с учетом изменения конструкции и появления эффекта реламиниризации может достичь эффективности улавливания золы до 93,7 %.

2. Отклонения в работу вносит неосесимметричность и невозможность достижения эффекта реламиниризации при малых расходах запыленного потока. Для лучшей работы устройства необходимо производить жесткую фиксацию направляющего аппарата, чтобы устранить подобные вариации сдвига. При сдвиге в 36,36 мм из цветовой градации можно отметить, что распределение скоростей происходит неравномерно, где сечение уже, там скорость потока больше и очистка газа проходит лучше.

3. Проведенная работа позволила сконструировать инерционно-вакуумный золоуловитель второго поколения, получить на него патент [13] и изготовить

аппарат, установив его на ТЭЦ-4 города Омска котла БКЗ-320. Это позволило сэкономить материальные и денежные средства на проведение предварительного натурного эксперимента.

4. Рассчитан диапазон существования явления реламиниризации, что является особенностью ИВЗ, как антициклона. Этим можно объяснить его невысокое сопротивление при сложной проточной части.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Дополнительные исследования передвижения направляющего аппарата в вертикальной плоскости могут показать качественные и количественные изменения по расходу и улавливанию зольных частиц, установить реальный диапазон возникновения реламиниризации.

2. Возможно сделать отверстия в рассекателе для создания дополнительного эффекта разрежения, как в ИВЗ первого поколения.

3. Также необходимо проанализировать возможный абразивный износ внутренних поверхностей установки, их влияние на эффективность золоулавливающего аппарата и оценить долговечность работы установки.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВЗП, в/п – воздухоподогреватель;

ДС, дс – дымосос;

E – напряженность электрического поля;

ЗПК – золоприемная камера;

ЗУУ – золоулавливающая установка

ИВЗ – инерционно-вакуумный золоуловитель;

Интер РАО ЕЭС – Российское акционерное общество «Единые энергосистемы России»;

K – коэффициент напряженности;

МКО – метод контрольных объемов;

Н. Э. – натурный эксперимент;

н/у – нормальные условия;

ОАО «ВТИ» – Открытое акционерное общество «Всероссийский теплотехнический институт»;

ОмГТУ – Омский государственный технический университет;

ПК – поворотная камера;

C – концентрация пыли;

$C\mu$, $C_{1\varepsilon}$, C_2, σ_ε – эмпирически константы k-ε модели;

САПР – Система автоматизированного проектирования;

Ч. Э. – численный эксперимент;

C_{cf} – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы идеальной сферической формы;

μ_t – турбулентная кинематическая вязкость;

CAD – Computer-Aided Design;

D – коэффициент диффузии;

e – диэлектрическая постоянная;

g – ускорение силы тяжести;

k – кинетическая энергия турбулентности, отнесенная к единице массы жидкости;

m, d – масса, диаметр частицы;

n – концентрация ионов в 1 $м^3$;

p – давления в жидкости;

$r_ч$ – радиус частицы;

Stk – критерий Стокса;

t – время;

T, μ, w, ρ – абсолютная температура, динамическая вязкость, скорость, плотность газа;

u, v, w– проекции вектора скорости жидкости;

$w_{ос}$ – скорость движения частицы;

ε – скорость диссипации в теплокинетической энергии турбулентности в единице объема жидкости;

μ – заданная физическая (ламинарная) вязкость (μ = const);

$ρ_c$ – плотность среды (газа);

ω – центробежный фактор осаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоглазова, Л. В. Значимость концепции ноосферы В. И. Вернадского в контексте современных экологических проблем / Л. В. Белоглазова // Россия и мировые тенденции развития: материалы Междунар. научно-практ. конф. – Омск, 2017. – С. 157–164.
2. Уголь России: влияние на окружающую среду и человека / под ред. О. Подосенова, В. Сливяк // РИА-новости. – Москва, 2013. – URL: https://bit.ly/2lJvwXC (дата обращения: 10.09.2019).
3. Данилов, А. С. Оценка техногенных массивов как источников экологической опасности / А. С. Данилов, В. А. Матвеева, М. А. Пашевич // Мир русского слова. – 2017. – № 2. – С. 115–120.
4. Гринин, А. С. Промышленные и бытовые отходы. Хранение, утилизация, переработка : учеб. пособие / А. С. Гринин, В. Н. Новиков. – Москва : ФАИР-ПРЕСС, 2002. – 339 с. – ISBN 5-8183-0442-6.
5. Мазур, И. И. Курс инженерной экологии : учеб. для вузов / И. И. Мазур, О. И. Молдаванов. – Москва : Высшая школа, 1999. – 447 с. – ISBN 5-06-003565-4.
6. Ноосферное воспитание, образование и просвещение / Ун-т им. В. И. Вернадского ; ред. Г. Б. Наумов. – 2005. – URL: https://bit.ly/2kG66db (дата обращения: 09.09.2019).
7. Об охране окружающей среды : федер. закон № 7-ФЗ : принят Гос. Думой 20 дек. 2001 г. : одобрен Советом Федерации 26 дек. 2001 г. – Мосвка : Проспект, 2016. – 78 с. – ISBN 978-5-392-19924-2.
8. Об охране атмосферного воздуха : федер. закон : принят Гос. Думой 2 апр. 1999 г. : одобрен Советом Федерации 22 апр. 1999 г. – Москва : КонсультантПлюс, 1999. – 32 с. – ISBN 978-5-93630-907-6.

9. Инструкция по нормированию выбросов (сбросов) загрязняющих веществ в атмосферу и в водные объекты : РД 153-34.0-03.303–98 : утверждена РАО «ЕЭС России» 1998–07–08 : дата введения 1998–01–09.
10. Промышленная экология : учеб. пособие / Е.А. Алябышева и др. – Йошкар-Ола : Мар. гос. ун-т, 2010. – 110 с. – ISBN: 978-5-9963-0812-5.
11. О порядке установления (утверждения) нормативов и выдачи разрешений на выбросы / Федеральная служба по надзору в сфере природопользования // Электронный фонд правовой и нормативной документации. – 2011. – URL: http://docs.cntd.ru/document/902317014 (дата обращения 07.09.2019).
12. Государственная программа Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики». – Москва : Правительство РФ, 2013. – 212 с.
13. Программа модернизации энергетики до 2030 года / В. А. Баринов, А. С. Маневич, М. И. Сапаров [и др.]. – Мосвка : ОАО ЭНИН «Энергетический ин-т им. Г. М. Кржижановского», 2011. – 25 с. – URL: https://bit.ly/2kGrI9h (дата обращения 11.09.2019).
14. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды» на 2012–2020 гг. (с изменениями на 30 марта 2018 г.) : федер. закон : принят Правительством РФ 15 апр. 2014 г. : утвержден постановлением Правительства РФ от 30 марта 2018 г. – Мосвка : Электронный фонд правовой и нормативно-технической литературы, 2018. – 7 с. – URL: http://docs.cntd.ru/.
15. Кузнецов, Н. В. Тепловой расчет котельных агрегатов: нормативный метод / Н. В. Кузнецов. – 2-е изд. – Мосвка : Энергия, 1973. – 297 с. – ISBN 978-5-4365-0014-0.
16. Белов, И. А. Моделирование турбулентных течений : учеб. пособие / И. А. Белов, С. А. Исаев. – Санкт-Петербург : Балтийский гос. техн. ун-т, 2001. – 108 с.
17. Жолондковский, О. И. Внимание, воздух! / О. И. Жолондковский. – Москва : Московский рабочий, 1985. – 160 с.
18. Бойко, Е. А. Золоулавливающие устройства тепловых электростанций :

учеб. пособие / Е. А. Бойко. – Красноярск : Изд-во КГТУ, 2005. – 212 с.

19. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий / М. Я. Берлянд [и др.]. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1987. – 93 с.
20. Охрана природы. Атмосфера. Источники и метеорологические факторы загрязнения, промышленные выбросы : ГОСТ 17.2.1.04–77 : дата введения 01–07–1978. – Москва : Изд-во стандартов, 1978.
21. Navicky, D. How point of use cyclones can improve dust control at your coal-fired plant // Journal Power Engineeering. – 2015. – URL: https://bit.ly/2krtyLn (date of access: 12.09.2019).
22. Волков, К. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с. – ISBN: 978-5-9221-0920-8.
23. Ковров, О. С. Порівняльна характеристика методик розрахунку технологічних параметрів роботи цилонів для пиловлювання / О.С. Ковров // Екологічна безпека, охорона праці. Науковий вісник національного гірничого університету. – 2013. – № 3. – С. 103–110.
24. Ravert, E. Energy-Efficient dust collection / E. Ravert // Ceramic industry. – 2007. – P. 29–31.
25. Дружакина, О. П. Проектирование сооружений пылегазоочистки : учебно-метод. пособие / О. П. Дружакина. – Ижевск : Удмуртский ун-т, 2014. – 44 с. – ISBN 978-5-9948-2955-4.
26. Фрик, П. Г. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций. Часть 1 / П. Г. Фрик. – Пермь : Пермский гос. техн. ун-т, 1998. – 108 с.
27. Замураев, А. Е. Расчет пылеуловителей. Расчет циклонов и рукавных фильтров : методические указания к курсовому проектированию / А. Е. Замураев. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 50 с.
28. Яблокова, М. А. Оборудование для очистки газовых выбросов промышленных предприятий. Аппараты для мокрой очистки : учеб. пособие. Ч. 2 / М. А. Яблокова, С. И. Петров. – Санкт-Петербург : СПбГТИ (ТУ), 2006. – 30 с.

29. Novikov, L. M. New electrocyclone for fine gas cleaning // Chemical and petroleum engineering. – 2011. – Vol. 47. – P. 64–69.

30. Ветошкин, А. Г. Процессы и аппараты пылеочистки : учеб. пособие / А. Г. Втошкин. – Пенза : Изд-во Пензенского гос. ун-та, 2005. – 210 с. – ISBN 978-5-9729-0162-3.

31. Биргер, М. И. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков ; под общ. ред. А. А. Русанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.

32. Вихревой пылеуловитель : пат. № 956027 Рос. Федерация : МПК B 04 C 3/06, B 04 C 5/30 / Лапшин А. Б. ; заявитель Научно-исследовательский и проектный ин-т по сооружениям, технике безопасности и охране труда в промышленности строительных материалов. – № 2978347/23-26 ; заявл. 05.09.80 ; опубл. 07.09.82.

33. Белоглазов, В. П. Современные золоулавливащие аппараты инерционного типа / В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова, П. М. Тоцких // Материалы VI междунар. научно-практ. конф. «Культура, наука, образование: проблемы и перспективы». – Нижневартовск : Нижневартовский гос. ун-т, 2017. – С. 94–98.

34. Исследование аэродинамики и эффективности улавливания лабиринтного золоуловителя / Ю. А. Алтухов, С. М. Кисляк, А. М. Аль Замил [и др.] // Вестник Кузбасского гос. техн. ун-та им. Т. Ф. Горбачева. – 2012. – № 5. – С. 97–101.

35. Пылеуловитель лабиринтного типа : пат. № 2031691 Рос. Федерация : МПК B 01 D 45/08 / Кисляк С. М., Пузырев Е. М., Сидоров А. М. ; заявитель Научно-производственное предприятие «ЭНЭКО». – № 93020815/26 ; заявл. 27.07.90 ; опубл. 27.03.95.

36. Алтухов, Ю. А. Аэродинамическое исследование турбулентного течения запыленного потока в разных типах золоуловителей при различных режимах работы / Ю. А. Алтухов, С. М. Кисляк, А. М. Аль Замили // В мире научных открытий. – 2011. – № 12. – С. 51–60.

37. Аль Замили А. М. Исследование эффективности улавливания лабиринтного золоуловителя на основе численного моделирования турбулентного течения запыленного потока / А. М. Аль Замили // Естественные и технические науки. – 2011. – № 4. – С. 468–471.
38. Алтухов, Ю. А. Численное и экспериментальное исследование эффективности лабиринтного золоуловителя / Ю. А. Алтухов, С. М. Кисляк, А. М. Аль Замили // Технические науки – от теории к практике : сб. ст. по материалам IV междунар. научно-практ. конф. – Новосибирск : СибАК, 2011. – С. 7–16.
39. Аль Замили, А. М. Численное моделирование турбулентного течения запыленного потока в центробежном золоуловителе / А. М. Аль Замили, Ю. А. Алтухов, С. М. Кисляк // Альманах современной науки и образования. – Тамбов, 2011. – № 10 (53). – С. 38–41.
40. Аль Замили, А. М. Математическое моделирование и аэродинамическое исследование турбулентного течения запыленного потока в золоуловителях : спец. 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»; 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» : дис. … канд. физ.-мат. наук /Аль Замили Али Мирали Джасим. – Барнаул, 2012. – 142 с. – Место защиты: Алтайский гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова.
41. Пылеуловитель лабиринтного типа : пат. № 2042395 Рос. Федерация : МПК B 01 D 45/08 / Кисляк С. М., Пузырев Е. М. ; заявитель Научно-исследовательский и проектный ин-т по сооружениям, технике безопасности и охране труда в промышленности строительных материалов. – № 93020815/26 ; заявл. 21.04.93; опубл. 21.04.95.
42. Пылеуловитель : пат. № 2447923 Рос. Федерация : МПК B 01 D 45/12 / Чистяков Я. В., Володина О. Н., Дубов А. Ю., Моисеева Л. А. ; заявитель ООО «ПОЛИСОРБ». – Опубл. 20.04.2012.
43. Центробежно-инерционный пылеуловитель : пат. № 111773 Рос. Федерация : МПК B 01 D 45/12 / Чистяков Я. В., Володина О. Н., Дубов А. Ю., Моисеева Л. А., Махнин А. А. – Опубл. 27.12.2011.
44. Пылеуловитель-Классификатор : пат. Рос. Федерация № 85366 : МПК B 04 C 5/08, B 07 B 7/08 / Я. В. Чистяков, А. В. Сугак, Н. И. Володин, Е. А. Сугак. – Опубл. 10.09.2009.

45. Смирнов, М. Е. Разработка метода расчета и усовершенствование конструкции вертикального прямоточного циклона : спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» : автореф. дис. … канд. техн. наук / Смирнов Михаил Евгеньевич. – Ярославль, 2001. – 22 с. – Место защиты: Ярославский гос. техн. ун-т.
46. Устройство для улавливания и классификации пыли по фракциям : пат. Рос. Федерация № 81092 : МПК B 01 D 45/04 / Володин Н. И., Леонтьев В. К., Смирнов Д. Е., Смирнов М. Е., Сугак А. В., Чистяков Я. В. – Опубл. 10.03.2009.
47. Смирнов, Д. Е. Совершенствование процесса сепарации частиц в инерционно-центробежном пылеуловителе-классификаторе : спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» : дис. … канд. техн. наук / Смирнов Дмитрий Евгеньевич. – Москва, 2011. –133 с. – Место защиты: Ярославский гос. техн. ун-т.
48. Чистяков, Я. В. Исследование и разработка пылеуловителей, обеспечивающих повышение эффективности очистки воздуха аспирационных систем дробильно-сортировочных комплексов карьеров : спец. 25.00.36 «Геоэкология» : автореф. дис. … канд. техн. наук / Я. В. Чистяков. – Тула, 2012. – 19 с. – Место защиты: ТГУ.
49. Чистяков, Я. В. Разделение газопылевого потока в центробежно-инерционом пылеуловителе с позиций эколого-экономического подхода / Я. В. Чистяков, А. А. Махнин, А. В. Невский // Тонкие химические технологии. Вестник МИТХТ. – 2012. – Т. 7., № 3. – С. 92–96.
50. Исследование движения и сепарации двухфазного потока в инерционно-центробежном пылеуловителе-классификаторе / Д. Е. Смирнов [и др.] // Известия Тульского гос. ун-та. – 2010. – № 2. – С. 334–339.
51. Чистяков, Я. В. Повышение эффективности отделения мелкодисперсной пыли в центробежно-инерционных аппаратах пылеулавливания / Я. В. Чистяков, К. М. Муратова, П. В. Васильев // Известия Тульского гос. ун-та. – 2015. – № 3. – С. 42–51.

52. Чистяков, Я. В. Разработка пылеуловителей нового поколения / Я. В. Чистяков, С. З. К. Калаева, К. М Муратова // Известия Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2013. – № 1. – С. 21–31.

53. Чистяков, Я. В. Разработка и исследование опытной конструкции высокоэффективного пылеуловителя и основ математической модели газодинамического процесса сепарации мелкодисперсной пыли / Я. В. Чистяков // Известия Тульского гос. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 45–47.

54. Самохвалов, Н. М. Инерционно-фильтрационный пылеуловитель / Н. М. Самохвалов, Е. В. Скачков // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 104–106.

55. Способ улавливания пыли в зернистых фильтрах : пат. № 1430072 СССР : МПК B 01 D 46/30 / Самохвалов Н. М., Ульянов Б. М., Быстрицкий А. А. ; заявитель Иркутский политехнический ун-т. – № 4103662/31-26 ; заявл. 04.08.86; опубл. 15.10.88.

56. Фильтр для очистки газа от пыли : пат. № 104863 Рос. Федерация : МПК B01D 46/00 / Самохвалов Н. М. – Заявл. 16.12.2010; опубл. 27.05.2011.

57. Samokhvalov, N. Jet-type Dust Collection Filter / N. Samokhvalov, Y. Zykova, V. Vinogradov // Ecology and Industry of Russia. – 2016. – Vol. 1, Iss. 20. – P. 4–7.

58. Зиганшин, М. Г. Проектирование аппаратов пылегазоочистки : учеб. пособие для студентов высших техн. заведений / М. Г. Зиганшин, А. А. Колесник, А. М. Зиганшин. – 2-е изд. – Москва : Лань, 2014. – 535 с. – ISBN 978-5-8114-1681-3.

59. Виноградов, В. В. Характеристики структуры щелевого фильтрующего слоя / В. В. Виноградов, Н. М. Самохвалов // Наука. Технологии. Инновации. Материалы Всерос. научной конф. молодых ученых: в 10 ч. – Новосибирск : Новосибирский гос. техн. ун-т, 2013. – С. 321–325.

60. Влияние осесимметричности «сомбреро» на степень эффективности улавливания инерционно-вакуумного золоуловителя / Л. В. Белоглазова, В. П. Белоглазов, И. Е. Чавриков [и др.] // Омский научный вестник. – 2015. – № 3 (143). – С. 230–232.

61. Влияние разрежения в сборной камере инерционно-вакуумного пылеуловителя на степень улавливания пыли / В. П. Белоглазов, Е. В. Оришевская, В. А. Корсаков [и др.] //Динамика систем, механизмов и машин : материалы VII Междунар. научно-техн. конф. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2009. – С. 66–68.
62. Инерционно-вакуумный пылеуловитель : пат. № 92358 Рос. Федерация : МПК B 01 D 45/06 / Белоглазов В. П., Ченцов А. В. ; заявитель ООО «Вихрь». – № 200914229/22 ; заявл. 22.10.09 ; опубл. 20.11.09.
63. Пылеуловитель : пат. № 93298 Рос.Федерация : МПК7 B 01 D 45/06 / Белоглазов В. П. ; заявитель ООО «Вихрь». – № 2009144229/22 ; заявл. 30.11.09 ; опубл. 27.04.10.
64. Дымосос ДН-10 и его параметры // Вентиляторный завод «Укрвентсистемы». – URL: http://www.ukrvent.com/dn-10_dymosos.html (дата обращения: 05.09.2019).
65. Корсаков, В. А. Влияние разрежения в бункере инерционно-вакуумного золоуловителя на степень улавливания золы / В. А. Корсаков. – Омск : ОмГТУ, 2012. – 116 с.
66. Белоглазов, В. П. Инерционный способ очистки газов / В. П. Белоглазов, Э. Х. Досалин, В. А. Корсаков // Проблемы, перспективы и стратегические инициативы развития теплоэнергетического комплекса : материалы Междунар. научно-практ. конф. (10 июня 2011 г.). – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – С. 239–244.
67. Белоглазов, В. П. Инерционный способ очистки газов от взвешенных частиц на базе инерционно-вакуумного пылеуловителя / В. П. Белоглазов, Э. Х. Досалин, В. А. Корсаков // Динамика систем, механизмов и машин : материалы VII Междунар. научно-техн. конф. –Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. – С. 66–68.
68. Белоглазов, В. П. Способы очистки отходящих газов, основанные на газодинамических эффектах, не применявшихся ранее в производстве / В. П. Белоглазов, В. А. Корсаков, А. В. Ченцов // Сб. докладов II Междунар. конф. «Пылегазоочистка-2009» (29–30 сент. 2009 г.). – Москва : ГК «Измайлово», 2009. – С. 62–66.
69. Simulation and optimization of cyclone dust separators / B. Breiderhoff,

Th. Bartz-Beielstein, B. Naujoks [et al.] // Workshop Computational Intelligence. – 2013. – P. 177–196.

70. Сологаев, В. И. Механика жидкости и газа : конспект лекций / В. И. Сологаев. – Омск: СибАДИ, 1995. – 56 с. – ISBN 5-230-15352-0.
71. Numerical modeling software package for computing aerodynamic characteristics of air cyclones / A. V. Ivanov, G. E. Dummov, A.V. Muslaev [et al.] // Chemical and petroleum engineering. – 2013. – Vol. 49 (3–4). – P. 187–195.
72. Efficiency of electrostatic cyclone operation / A. G. Titov, Z. R. Gil'vanova, N. V. Inyushkin [et al.] // Chemical and petroleum engineering. – 2013. – Vol. 49. – P. 655–659.
73. Large eddy simulation of the vortex end in re-verse-flow centrifugal separators / G. I. Pisarev, A. C. Hoffmann, W. Peng [et al.] // Numerical analysis and applied mathematics. – 2009. – Vol. 1168, Iss. 2. – P. 641–644.
74. Numerical investigation of gas-solid two-phase flow in a tiny-oil ignition cyclone burner for a 300-MW down-fired pulverized coal-fired boiler / Z. Hao, M. Gui-yuan, Y. Yang [et al.] // American society of civil engineers. – 2013. – Vol. 140, Iss. 1. – P. – 36–39.
75. Shaaban, S. Numerical optimization and experimental investigation of the aerodynamic performance of a three-stage gas-solid separator / S. Shaaban // Chemical engineering research and design. – 2011. – Vol. 89, Iss. 1. – P. 29–38.
76. Смирнов, Е. М. Развитие и использование на кафедре гидроаэродинамики современных вычислительных средств для решения фундаментальных и прикладных проблем механики жидкости и газа / Е.М. Смирнов // Материалы XI Всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГПУ, 2007. – С. 91–95.
77. Пирумов, У. Г. Численные методы газовой динамики : учеб. пособие для втузов / У. Г. Пирумов, Г. С. Росляков. – Москва : Высшая школа, 1987. – 232 с.
78. Репик, Е. У. Турбулентный пограничный слой / Е. У. Репик, Ю. П. Соседко. – Москва : ФИЗМА-ТЛИТ, 2007. – 312 с. – ISBN 978-5-9221-0822-5.

79. Нигматуллин, Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. 1 / Р. И. Нигматуллин. – Москва : Наука, 1987. – 464 с.
80. Friedlander, S. K. Turbulence Classic papers on statical theory / S. K. Friedlander, L. Topper. – London : Interscience publishers inc., 1961. – 195 p.
81. Белоглазова, Л. В. Анализ математической модели при решении задач с запыленным потоком / Л. В. Белоглазова // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы развития : Материалы II Всерос. научно-практ. конф. – Нижневартовск : Изд-во НГУ, 2017. – С. 98–100.
82. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский . – 7-е изд. – Москва : Дрофа, 2003. – 840 с. – ISBN 5-7107-6327-6.
83. Kharoua, N. Study of the pressure drop and flow field in standard gas cyclone models using the granular model / N. Kharoua, L. Khezzar, Z. Nemouchi // International Journal of Chemical Engineering. – 2011. – P. 1–11.
84. Усанина, А. С. Движение аэрозольных частиц в потоке / А. С. Усанина, В. А. Архипов. – Томск : Изд. дом Томского гос. ун-та, 2013. – 92 с. – ISBN 978-5-9462-1420-9.
85. Серебрянський, Д. О. Матиматичне моделювання процессу очищення запилених газових потоків в циклонному пиловловлювачі / Д. О. Серебрянський, С. В. Плашихін, Ю. О. Безносик [и др.] // Экология. – 2014. – № 2 (68). – С. 11–16.
86. ANSYS. – URL: https://bit.ly/2kvUnhx (date of access: 10.09.2019).
87. ANSYS. Meshing User’s guide. – Canonsburg : ANSYS Inc, 2012. – 474 p.
88. Вараксин, А. Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами / А. Ю. Вараксин. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 192 с. – ISBN 5-9221-0320-2.
89. Уайт П. Высокоэффективная очистка воздуха / П. Уайт, С. Смит. – Москва : АТОМ-ИЗДАТ, 1967. – 312 с.
90. Усовершенствование системы питания танкового двигателя воздухом с применением инерционно-вакуумного аэрофильтра / Э. Х. Досалин [и др.] // Молодежь. Техника. Космос: тр. IV Общероссийской молодѣжной научно-техн. конф. – 2012. – С. 201–202.

91. Коузов, П. А. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности / П. А. Коузов, А. Д. Малыгин, Г. М. Скрябин. – 2-е изд. – Санкт-Петербург : Химия, 1993. – 320 с. – ISBN 5-7245-0646-7.
92. Чигарёв, А. В. ANSYS для инженеров / А. В. Чигарёв, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – Москва : Машиностроение-1, 2004. – 512 с. – ISBN 5-94275-048-3.
93. Фрик, П. Г. Турбулентность: модели и подходы. Ч. 2 / П. Г. Фрик. – Пермь : Пермский гос. техн. ун-т, 1999. – 136 с. – ISBN 5-88151-193-0.
94. Wilcox D. Turbulence modeling for CFD / D. Wilcox. – 3rd ed. – California : DCW Industries, 2006. – 536 p. – ISBN 0-9636051-0-0.
95. Долинин, К. А. Применение программного комплекса ANSYS FLUENT для моделирования движения пылегазового потока / К. А. Долинин, Д. А. Долинин // Материалы МНТК Энергия. – Иваново : ИГЭУ, 2012. – С. 15–18.
96. Zhang L. Study on numerical simulation of internal flow fields in the new-type / L. Zhang, L. Ming, Y. Yong // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 507. – P. 869–873.
97. Миньков, Л. Л. Численное решение задач гидродинамики с помощью вычислительного пакета ANSYS Fluent / Л. Л. Миньков, К. М. Моисеева. – Томск : STT, 2017. – 122 с. – ISBN 078-5-05670-564-7.
98. Жабо, В. В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС / В. В. Жабо. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 240 с. – ISBN 5-283-00001-X.
99. Вальдберг А. Ю. Современные тенденции развития теории и практики пылеулавливания. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – №. 7. – С. 48–50.
100. Val’dberg A. Y. Analysis of the disperse composition of dust in a gas flow at the outlet from a deduster / A. Y. Val’dberg, N. G. Komarova // Chemical and petroleum engineering, 2011. –Vol. 46. – P. 760–766.
101. Белоглазов, В. П. Разработка инновационного газоочистного оборудования / В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова // Ученые Омска – региону : Материалы II Региональной научно-техн. конф. / под общ. ред. Л. О. Штриплинга. – Омск : ОмГТУ, 2017. – С. 220–224.

102. Misyulya D. I. Developing an untwisting device for cyclones and estimating its parameters // D. I. Misyulya, V. V. Kuz'min, V. A. Markov // Theoretical foundations of chemical engineering. – 2013. – Vol. 47, Iss. 1. – P. 274–283.
103. Белоглазов, В. П. Влияние высоты рассекателя на эффективность улавливания золы экибастузского угля в инерционно-вакуумном золоуловителе / В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова // Надежность и безопасность энергетики. – Москва : НПО Энергобезопасность. – 2016. – № 1 (32). – С. 46–49.
104. Белоглазов, В. П. Влияние элементов геометрии ИВЗ на эффективность улавливания золы / В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова // Вестник науки и образования. – 2015. – № 7 (9). – С. 5–8.
105. Effect of cyclone height on holdup mass and heat transfer rate in solid cyclone heat exchanger-cfd approach / T. Mothilal, V. Velukumar, K. Pitchandi [et al.] // ARPN Journal of engineering and applied sciences. – 2016. – Vol. 11, Iss. 2. – P. 1269–1276.
106. Sick A. G. Gravimat SHC501 Система для измерения запыленности гравиметрическим методом – Sick Sensor Intelligence [руководство по эксплуатации] / A. G. Sick. – Germany, 2015. – 66 с.
107. Трубки напорные модификаций НИИОГАЗ и Пито : [док. внутреннего пользования] / гл. специалист по метрологии Ю. Ю. Бабина. – 14 с.
108. ГСИ. Расход жидкости и газа. Методика выполнения измерений по скорости в одной точке сечения трубы : ГОСТ 8.361-79 : дата введения 01–07–1980. – Москва : Изд-во стандартов, 1985. – 10 с.
109. Манометр дифференциальный цифровой ДМЦ-01М – ООО НПО «Эко-интех»[руководство по эксплуатации]. – Москва : ООО НПО «Эко-интех», 2011. – 48 с.
110. Методика испытаний золоулавливающих установок тепловых электростанций и котельных : РД 153-34.1-27.301-2001 : утвержден Деп. научно-техн. политики и развития РАО «ЕЭС России» 2001–30–09 : дата введения 2003–01– 01. – Москва : ОАО «ВТИ», 2001. – 80 с.
111. Лазарев, Л. Я. Исследование и расчет сверхзвуковых сопловых решеток

турбин : дис. … канд. техн. наук. – Москва, МЭИ, 1964. – 153 с.

112. Moretti, P. M. Heat Transfer to a turbulent boundary layer with varying free stream velocity and varying surface temperature an experimental study / P. M. Moretti, W. M. Kays // International Journal of Heat and Mass Transfer, 1965. – Vol. 8 (9). – P. 1187–1202.
113. The structure of turbulent boundary layers / F. A. Schraub, W. C. Reynolds, F. A. Schraub [et al.] // Journal of Fluid Mechanics. – 1967. – Vol. 30, Iss. 4. – P. 741–773.
114. Марков Н. М. Теория и расчет лопаточного аппарата осевых турбомашин / Н. М. Марков. – Ленинград : Машиностроение, 1966. – 240 с.
115. Кэйс В. М. Конвективный тепло- и массообмен / В. М. Кэйс. – Москва : Энергия, 1972. – 448 с.
116. Юренев В. Н. Теплотехнический справочник / В. Н. Юренев, П. Д. Лебедев. – 2-е изд. – Москва : Энергия, 1976. – 896 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального
директора, научный руководитель
ОАО «ВТИ»

_____ А.Г. Тумановский

“ ” _____ 2016г.

А К Т

О внедрении результатов диссертационной работы
Белоглазовой Любовь Владимировны «Исследование влияния
геометрических характеристик инерционно-вакуумного золоуловителя нк
степень улавливания золы экибастузского угля»
По специальности 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика»

Комиссия в составе:
Председатель: А.Г. Тумановский – Первый заместитель генерального директора, научный руководитель ОАО «ВТИ»,

Члены комиссии:

Брагина О. Н. – заведующая отделением защиты атмосферы от вредных выбросов теплоэнергетики ОАО «ВТИ»

Зыков А.М. – заведующий лабораторией золоулавливания и очистки газов от окислов азота ОАО «ВТИ»

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Белоглазовой Любови Владимировны «Исследование влияния геометрических характеристик инерционно-вакуумного золоуловителя на степень улавливания золы экибастузского угля» использованы при разработке конструкции инерционно-вакуумного золоуловителя, опытный экземпляр которого будет установлен на котле №4 Омской ТЭЦ-4.

От ОЗА Брагина О.Н.

От лаборатории золоулавливания Зыков А.М.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Приложение № 1
к дополнительному соглашению № 2
к договору № 15001 от 15.10.2015 г.
от «__»_____2018 г.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по оперативному управлению ОАО «ВТИ»

_____ В.В. Мартынов

«___»_____2018 г.

М.П.

СОГЛАСОВАНО:

Ректор ОмГТУ

_____ А.В. Косых

«___»_____2018 г.

М.П.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

На выполнение работы по теме:

«Разработка инерционно-вакуумного золоуловителя (ИВЗ) и его испытания»

Руководитель темы:

Сроки выполнения: дата подписания договора; окончание – 20 ноября 2018 г.

1. Требования:

1.1. Требования по стандартизации, унификации, совместимости и взаимозаменяемости;
Все разрабатываемые технические решения должны соответствовать Федеральному закону «О техническом регулировании», системе стандартов и НТД РФ.

1.2. Требования по обеспечению безопасности для жизни и здоровья людей и охраны окружающей среды;
В ходе выполнения работы обеспечить соблюдение действующего законодательства, норм, правил и руководящих документов РФ.

2. Содержание.

1 этап «Разработка технического задания на рабочий проект ИВЗ, проведение патентных исследований и организация испытаний существующей золоулавливающей установки».

- Анализ зарубежного и российского опыта использования систем предочистки дымовых газов, сравнение технических решений по предварительной очистке, реализованных на различных котлоагрегатах ТЭС России и мира с оценкой эффективности золоулавливания, капитальных и эксплуатационных затрат;

- Оценка возможности применения ИВЗ в качестве предочистки на золоулавливающих установках Омской ТЭЦ-4;

- Разработка технического задания на рабочий проект ИВЗ, календарного графика изготовления, монтажа и испытаний опытно-промышленного аппарата ИВЗ, согласованного с Заказчиком и техническими специалистами Омской ТЭЦ-4, участие в разработке рабочего проекта;

- Проведение патентных исследований;

2 этап «Предварительные испытания ИВЗ-1»

- Участие в предварительных испытаниях ИВЗ-1;
- Участие в обработке результатов предварительных испытаний и их сравнение с результатами полученными расчетным путем по фактическим размерам проточной части ИВЗ-1;
- Рекомендации по корректировке конструкционных параметров ИВЗ-1 по результатам предварительных испытаний;
- При необходимости модернизации ИВЗ-1, после нее участие в испытаниях модернизированного ИВЗ-1 и обработка полученных результатов;
- Написание инструкции по эксплуатации ИВЗ.

3 этап «Опытно-промышленные испытания и опытно-промышленная эксплуатация установки ИВЗ»

- Организация и участие в проведении опытно-промышленных испытаний установки ИВЗ, техническое сопровождение опытно-промышленной эксплуатации установки ИВЗ;
- Разработка рекомендаций по применению ИВЗ на энергообъектах Группы «Интер РАО».

3. Перечень научной, технической и другой документации, представляемой по результатам работы

По 1 этапу работ:

Отчет о НИР, содержащий оценку возможности применения ИВЗ в качестве предочистки на золоулавливающих установках Омской ТЭЦ-4, результаты определения оптимальных размеров установки ИВЗ, отчет о патентных исследованиях, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96, техническое задание на разработку рабочего проекта ИВЗ, календарный график изготовления, монтажа и испытаний опытно-промышленного аппарата ИВЗ.

По 2 этапу работ:

Отчет о НИР, содержащий результаты предварительных испытаний, результаты расчетов по фактическим размерам и их анализ, сравнение результатов предварительных испытаний ИВЗ1 и ранее существующей установки, рекомендации по корректировке проекта ИВЗ-1 и внесению изменений в конструкцию ИВЗ-1 по результатам предварительных испытаний, испытания модернизированного ИВЗ-1 и обработка полученных результатов, инструкция по эксплуатации ИВЗ.

По 3 этапу работ:

Отчет, содержащий программу испытаний установки ИВЗ, включающий два аппарата ИВЗ и электрофильтр, результаты испытаний, включая протоколы испытаний установки ИВЗ, заключение о готовности к вводу установки ИВЗ в опытно-промышленную эксплуатацию, рекомендации по применению инерционно-вакуумного золоуловителя на энергообъектах Группы «Интер РАО».

Приложение № 2
к дополнительному соглашению № 2
к договору № 15001 от 15.10.2015 г.
от «__»_____2018 г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ по теме:

«Разработка инерционно-вакуумного золоуловителя (ИВЗ) и его испытания»

№ п/п	Наименование самостоятельных этапов, оформляемых актом сдачи-приемки, а также этапов, оплачиваемых по согласованным срокам	Срок выполнения начало-окончание	Стоимость работ, тыс. руб.	Передаваемая документация, оборудование, акты
1	Разработка технического задания на рабочий проект ИВЗ, проведение патентных исследований и организация испытаний существующей золоулавливающей установки	Дата подписания договора-15 сентября 2015 г.	250,0	Отчет о НИР, содержащий оценку возможности применения ИВЗ в качестве предочистки на золоулавливающих установках Омской ТЭЦ-4, результаты определения оптимальных размеров установки ИВЗ, отчет о патентных исследованиях, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96, техническое задание на разработку рабочего проекта ИВЗ, календарный график изготовления, монтажа и испытаний опытно-промышленного аппарата ИВЗ.
2	Предварительные испытания ИВЗ1	15 сентября 2015 г.-03 июля 2018 г.	200,0	Отчет о НИР, результаты предварительных испытаний, сравнение результатов предварительных испытаний ИВЗ1 и ранее существующей установки, рекомендации по корректировке проекта ИВЗ-1 и

				внесению изменений в конструкцию ИВЗ-1 по результатам предварительных испытаний, испытания модернизированного ИВЗ-1 и обработка полученных результатов, инструкция по эксплуатации ИВЗ.
3	Опытно-промышленные испытания и опытно-промышленная эксплуатация установки ИВЗ	04 июля 2018 г. – 20 ноября 2018 г.	100,0	Отчет, содержащий программу испытаний установки ИВЗ, включающий два аппарата ИВЗ и электрофильтр, результаты испытаний, включая протоколы испытаний установки ИВЗ, заключение о готовности к вводу установки ИВЗ в опытно-промышленную эксплуатацию, рекомендации по применению инерционно-вакуумного золоуловителя на энергообъектах Группы «Интер РАО».

Ректор ОмГТУ

_____ Косых А.В.

«___» _____ 2018 г.

М.П.

Руководитель работ:

_____ В.П. Белоглазов

Заместитель генерального директора по оперативному управлению ОАО «ВТИ»

_____ Мартынов В.В.

«___» _____ 2018 г.

М.П.