

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

Подразделение: Инженерная школа энергетики
 Отделение: НОЦ И. Н. Бутакова
 Направление: 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Анализ существующих методов очистки дымовых газов ТЭС от вредных выбросов

УДК 621.311.22:662.96

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ91	Бурцев В.В.		

Руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Директор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Матвеев А.С.	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселёва Е.С.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООТД ШБИП ТПУ	Черемискина М.С.	—		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
«Экологически чистые технологии преобразования энергоносителей»	Губин В.Е.	к.т.н., доцент		

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы магистра «Экологически чистые технологии преобразования энергоносителей» по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника» в соответствии целями основной образовательной программы, видами и задачами профессиональной деятельности, указанными в ФГОС ВО 13.04.01

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы её совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен проектировать технологические системы и отдельные элементы систем преобразования энергоносителей
ПК(У)-2	Способен производить прогностическую оценку воздействия технологий энергетики на окружающую среду, применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности
ПК(У)-3	Способен проектировать и организовывать образовательный процесс с использованием современных технологий
ПК(У)-4	Способен применять современные методы и средства практической инженерной деятельности в сфере создания и эксплуатации современного оборудования и установок для экологически чистого преобразования энергоносителей
ПК(У)-5	Способен осуществлять управление технологическими процессами и энергетическими установками
ПК(У)-6	Способен определять потребности производства в ресурсах, обоснованию мероприятий по экономии энергоресурсов
ПК(У)-7	Способен производить сравнительный анализ технологий преобразования энергоносителей
ПК(У)-8	Способен формулировать решения профессиональных задач путём интеграции фундаментальных разделов технических наук и прикладных знаний в сфере теплоэнергетики

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

Подразделение: Инженерная школа энергетики
 Отделение: НОЦ И. Н. Бутакова
 Направление: 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

УТВЕРЖДАЮ:
 руководителем ООП
 _____ Губин В.Е.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации <small>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)</small>

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ91	Бурцев Всеволод Валерьевич

Тема работы:

Анализ существующих методов очистки дымовых газов ТЭС от вредных выбросов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	15.04.2021, №105-50/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2021
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(название объекта исследования и его характеристик; описание режима работы объекта; обозначение состава сырья, особенностей процесса или наименование типа изделия, а также требований прикрепленных к нему; формирование правил безопасности при работе с объектом и в ходе исследовательского процесса; определение энергозатрат и проведение экономического анализа и т.д.).</i></p>	<p>Объект аналитического исследования – система золоулавливания на примере Томской ГРЭС-2. Предмет исследования – методы очистки дымовых газов от золы. Цель работы – анализ существующих технологий золоулавливания для повышения эффективности очистки дымовых газов.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(определение научных достижений в мире за счёт проведение обзора и анализа различных литературных источников в соответствующей области; определение задач исследования; формирование методики исследования; анализ полученных результатов; написание специальных разделов, требующих разработки; формирование выводов по</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор научно-технической литературы по состоянию угольной энергетики (Парижское соглашение, угольная стратегия до 2035 года). 2. Анализ существующих методов очистки дымовых газов. Расчёт золоуловителей (на примере Томской ГРЭС-2). Анализ полученных результатов. 3. Финансовый менеджмент. 4. Социальная ответственность. 5. Основные результаты и выводы.

<i>результатам исследованию, определению дальнейших планов на исследование).</i>	
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентационный материал.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Киселёва Елена Станиславовна
«Социальная ответственность»	Черемискина Мария Сергеевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Обзор методов очистки дымовых газов/ Overview of flue gas cleaning methods	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.12.2020
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Директор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Матвеев А.С.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ91	Бурцев В.В.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ91	Бурцеву Всеволоду Валерьевичу

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	30% премии; 20% надбавки; 16% накладные расходы; 30% районный коэффициент; 15% коэффициент доп. ЗП.
3. Используемая система отчислений	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ	«Портрет» потенциального потребителя; анализ и оценка конкурентоспособности НИ; SWOT-анализ.
2. Разработка устава научно-технического проекта	Заинтересованные стороны проекта, роль и функции участников проекта.
3. Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет.	Формирование плана и графика разработки: - определение трудоемкости работ; - определение структуры работ; - разработка графика Гантта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: - материальные затраты; - заработная плата; - отчисления во внебюджетные фонды; - накладные расходы; - разработка оборудования - амортизационные отчисления.
4. Определение финансовой, социальной, сравнительной эффективности	Интегральный показатель ресурсоэффективности проекта 4,75.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Ограничения и допущения проекта
4. Диаграмма Гантта
5. Бюджет затрат ВКР
6. Оценка финансовой, социальной и сравнительной эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселёва Елена Станиславовна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ91	Бурцев Всеволод Валерьевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ91	Бурцеву Всеволоду Валерьевичу

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	НОЦ И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Тема ВКР:

Анализ существующих методов очистки дымовых газов ТЭС от вредных выбросов	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: система золоулавливания Томской ГРЭС-2. Область применения: очистка дымовых газов от золы.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018); ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: отклонение показателей микроклимата, превышение уровня шума, недостаточное освещение рабочей зоны, повышенный уровень вибрация. Опасные факторы: электрический ток.
3. Экологическая безопасность:	Атмосфера: выбросы дымовых газов. Гидросфера: образование сточных вод. Литосфера: загрязнение почвы хим. веществами, содержащимися в золе.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС: взрывы, неконтролируемый выброс токсичных жидкостей, наводнение, разрыва резервуаров, угроза пандемии. Наиболее типичная ЧС: пожар.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	21.02.21
--	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ91	Бурцев Всеволод Валерьевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 136 с., 23 рис., 52 табл., 71 источник, 2 приложения.

Ключевые слова: золоуловители, зола, ТЭС, выбросы дымовых газов, методы очистки дымовых газов, экологическая энергетика.

Объектом исследования является система золоулавливания на примере Томской ГРЭС-2.

Цель работы: анализ существующих технологий золоулавливания с целью повышения эффективности очистки дымовых газов.

В результате аналитического исследования были рассмотрены существующие технологии очистки дымовых газов от золы и выявлены перспективные варианты; произведён расчёт золоулавливающего оборудования на примере Томской ГРЭС-2.

Метод исследования: аналитический.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013 с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2013.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Определения:

Летучая зола – негорючий тонкодисперсный остаток, образующийся из минеральных компонентов после сжигания топлива (в большей степени угля) и содержащий в продуктах сгорания (дымовых газов);

Золоуловитель – техническое устройство, предназначенное для непрерывной очистки дымовых газов от золы;

Скорость дрейфа частиц – скорость движения частица к осаждающей поверхности внутри очищающего аппарата;

Вредные вещества – «вещество, которое при контакте с организмом человека в случае нарушения требований безопасности может вызывать производственные травмы, профессиональные заболевания или отклонения в состоянии здоровья» [26].

Обозначения, сокращения:

ТЭС – тепловая электростанция;

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;

ЗШО – золошлаковые отходы;

ГЗУ – гидрозолоудаление;

ПДК – предельно допустимая концентрация;

ПДВ – предельно допустимые выбросы;

ЗУ – золоуловитель (золоулавливание);

НУВ – нормы удельных выбросов;

МЗУ – мокрый золоуловитель;

ЭФ – электрофильтр;

КТЦ – котлотурбинный цех;

ЧС – чрезвычайная ситуация;

ВПУ – водоподготовительная установка;

ТЭБ – топливно-энергетический баланс;

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина;

ДГ – дымовые газы;

БЩУ – блочный щит управления.

Нормативные ссылки:

1. Трудовой кодекс РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021);
2. ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя.
3. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»;
4. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности»;
5. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение». Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*»
6. СН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация...»;
7. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. «Вибрационная болезнь. Общие требования»;
8. ГОСТ 12.1.038-82. «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов».
9. ГОСТ 17.1.3.13-86 Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнения;
10. СТО 70238424.13.030.10.001-2008 «ТЭС. Экологическая безопасность ЗШО».
11. ГОСТ Р 22.0.01-2020 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях»;
12. Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 N 123-ФЗ;
13. ГОСТ 12.1.004-90 ССБТ «Организация обучения безопасности труда»;
14. ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ «Взрывобезопасность».

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	11
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	13
1.1 Состояние угольной промышленности и её стратегия развития до 2035 года	13
1.2 Парижское соглашение и будущее угля	17
1.3 Выбросы ТЭС на твёрдом топливе	23
2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ОТ ЗОЛЫ	28
2.1 Свойства золы	28
2.2 Золоуловители отечественных ТЭС (используемые и внедряемые)	29
2.3 Мероприятия и технологии повышению эффективности очистки дымовых газов от золы	48
2.4 Оценка конкурентоспособности технологий	55
2.5 Расчёты золоулавливающих установок	58
2.6 Анализ результатов расчётов и альтернативных решений	73
3. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ	76
3.1 Предпроектный анализ	76
3.2 Инициация проекта	82
3.3 Планирование управления научно-техническим проектом	84
3.4 Определение финансовой, социальной и сравнительной эффективности исследования	91
4. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	99
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	99
4.2 Производственная безопасность	101
4.3 Экологическая безопасность	110
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	113
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	115
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	116
ПРИЛОЖЕНИЯ	122

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении многих лет основная доля вырабатываемой энергии в мире получается за счёт невозобновляемых ресурсов. Таким образом, использование невозобновляемых источников энергии за полвека выросло более чем в 20 раз [1].

Известно, что сжигание ископаемых топлив негативно сказывается на окружающей среде. В России значительная часть загрязнений (атмосферные выбросы до 70%, сточные воды и твёрдые отходы до 30-40% от всего количества) связана с деятельностью ТЭС, не говоря уже о воздействии на биосферу при добыче и транспортировке этих топлив [2].

Поэтому с каждым годом становятся острее экологические проблемы. Однозначно, они требуют комплексного подхода.

Также в последние годы в Европе существует тенденция отказа от использования традиционного угольного топлива, что определённо влияет на остальной мир. Но тот же угольный сектор в России пока составляет весомую часть энергетического баланса (рисунок 1), чтобы быть полноценно заменённым иными ресурсами и технологиями.



Рисунок 1 – Энергетический баланс России за 2019 год

В связи с этим существуют различные направления по развитию угольной энергетики [3-6]:

- рациональная эксплуатация топливных ресурсов (энергосбережение на законодательном уровне, улучшение изоляции здания и т.д.);
- повышение КПД использования ископаемого топлива за счёт комбинированной работы ТЭС и альтернативных/новых энергетических технологий (газификация, сжигание в кипящем слое и т.д.);

- усовершенствование очистительных устройств;
- десульфурация ископаемого топлива с целью снижения выбросов серы в атмосферу;
- утилизация отходов производства (превращение их в полезную продукцию);
- внедрение малоотходных технологий (создание замкнутой системы).

Каждое из перечисленных направлений, безусловно, заслуживает отдельного внимания. Однако с точки зрения усовершенствования уже эксплуатируемых технологий большой интерес представляют системы золоулавливания.

В данной работе производится анализ действующих и инновационных методов очистки дымовых газов от золы.

Цель работы: анализ существующих технологий золоулавливания с целью повышения эффективности очистки дымовых газов.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Состояние угольной промышленности и её стратегия развития до 2035 года

Прежде всего, необходимо понимать, в каком состоянии находится угольная промышленность и какие у неё перспективы, чтобы осознанно подходить к вопросу золоулавливающего оборудования.

В настоящее время угольная отрасль в России обладает рядом внешних вызовов [7]:

- развитие альтернативных источников энергии (водородная энергетика и т.д.) и увеличение влияния природного газа в энергетическом балансе;
- усиленная конкуренция на мировом рынке;
- ратифицированное Парижское соглашение по климату;
- некоторое снижение потребления угля в мире из-за экологических и климатических факторов.

И внутренних:

- низкая эффективность производства;
- низкая доходность угольной промышленности.

Существуют множество точек зрения насчёт альтернативной или, так называемой, «безуглеродной» энергетике, которая предполагается в скором времени заменит традиционные источники. Однозначно эта сфера обладает потенциалом, одна существует ряд допущений, которым недостаточно уделяют внимания.

Например, материалы для солнечных батарей или ветроустановок имеют в своём составе углерод, что уже подразумевает не экологически чистую выработку энергии.

Если же рассматривать водородное топливо, как главного кандидата возобновляемой энергетике, которое может применяться в хим. промышленности, нефтепереработке или в производстве электродвигателей, то необходимые инвестиции для развития этой отрасли (дорогостоящие

накопители, топливные элементы, энергетические транспортные системы) не позволят ей занять ведущие позиции в энергетическом балансе. Ведь необходимо иметь совершенные технологии улавливания углекислого газа, который выделяется при выработке водорода, иначе страна будет под излишний углеводородный налог в Европе, и, следовательно, рентабельность будет снижаться. Вдобавок, если посмотреть на технологическую цепь производства водорода, то она окажется не очень эффективной: электричество для производства гидролиз воды – производство водорода – использование водорода для производства электричества.

Также, стоит учитывать, что Россия состоит из территорий с неоднородным и нестабильным климатом, поэтому часть из альтернативных технологий (ветроэнергетика, гелиоэнергетика и др.) не сможет непрерывно генерировать энергию или производить её в достаточном количестве, что непригодно для крупной и средней энергетики (малая – не влияет существенно на ТЭБ).

Из выше описанных утверждений понятно, что экологические проблемы твердого топлива следует в основном решать путём технологических изменений угольной отрасли, хотя и не стоит игнорировать возобновляемый сектор энергетики.

Если обратиться к докладу [9], то выделяют следующие причины снижения значимости ископаемого топлива:

- «исчерпание традиционных запасов углеводородов на горизонте 50-100 лет (рисунок 2);
- высокие капитальные затраты и себестоимость разработки нетрадиционных запасов углеводородов;
- снижение темпов роста спроса и цен на углеводороды;
- изменение структуры мирового ТЭБ, в частности снижение нефтеёмкости мировой экономики;
- ужесточение природоохранного законодательства, и, как следствие, введений ограничений на отходы».

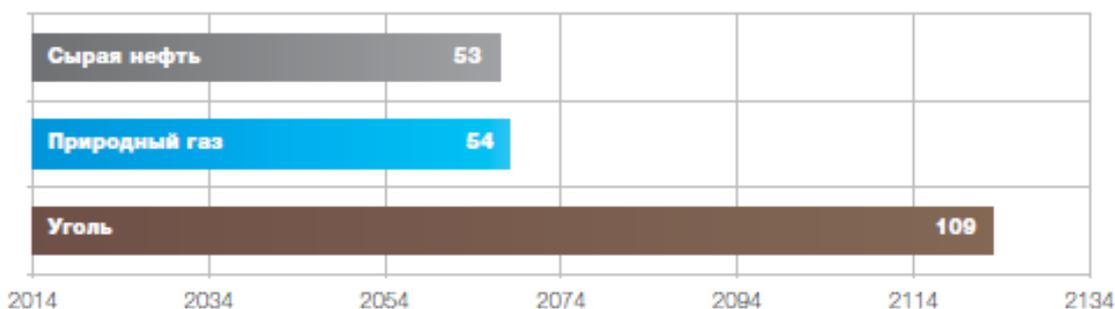


Рисунок 2 – Сроки истощения ископаемых видов топлива

Несмотря на текущие тенденции, угольная энергетика находится на должном уровне: не подвергается сильному вытеснению из ТЭБ, хотя в последнее время наблюдается смещение эн. баланса в сторону нефти и газа, и переживает стадию реформирования.

По итогам за 10 лет «объем добычи российского угля вырос более чем в 1,3 раза и в настоящее время превышает уровень 440 млн. тонн в год; в 2,5 раза (в текущих ценах) вырос объем инвестиций в основной капитал угольных предприятий; введено 297 млн. тонн новых мощностей по добыче угля. Продолжается концентрация горных работ; на шахтах среднесуточная добыча из одного очистного забоя выросла в среднем по отрасли в 2,2 раза.

В некоторых регионах осваиваются новые месторождения: в Забайкальском крае началось промышленное освоение Апсатского месторождения; в Хабаровском крае ведутся модернизация и расширение Ургальского угольного комплекса с формированием необходимой инфраструктуры; в Республике Тыва началось освоение месторождений Улуг-Хемского угольного бассейна и так далее» [7].

В стране 21 регион, где располагается около 240 действующих предприятий, занимается добычей и переработкой угля. Ведущим угледобывающим регионом является Кемеровская область. В 2016 году в ней было получено около 230 млн. т. угля, что составляет примерно 60% от общего количества добычи [14].

В настоящее время Россия занимает третье место в мире по экспорту угля (около 12%). Структура экспорта имеет стабильный характер: за

последние пять лет усилилась роль восточного направления [11]. Но при этом отечественная транспортировка уступает в эффективности западным поставщикам из-за особенностей инфраструктуры (длинные железнодорожные и короткие морские пути), которая требует усовершенствования [12].

Так как на мировой арене наблюдаются снижение темпов добычи угля за счёт перехода западных стран на «зелёную» энергетику, то Россия может обеспечить стабильное развитие угольной промышленности, экспортируя сырьё странам, неподверженным стратегии экологически чистой энергетики, и параллельно модернизируя технологии отрасли [10].

Несмотря на своеобразный спад интереса к углю на внешнем рынке сохраняется серьёзная конкуренция (Китай, США, Индия и др.). У России есть все предпосылки (масштабная сырьевая база, относительно дешёвая рабочая сила, география) сохранить лидирующие позиции и расширить своё влияние за счёт азиатских стран тихоокеанского региона [13].

В связи с текущим положением вещей Российской Федерацией был намечен курс на преобразование угольной энергетики, который заключается в модернизации предприятий и прилегающих к ним транспортных сообщений, применении оборудования с высокой производительностью и эффективных технологий для добычи, переработки и эксплуатации угольного топлива [7].

Это может означать, что будет сделан акцент на получение новых продуктов переработки угля, таких как: синтез-газ, брикетирование, уголь с повышенной калорийностью (или же обогащённый), угольная химия и др. Перечисленная продукция за счёт своего разнообразия повысит прибыль от угольной отрасли.

По подпрограмме "Развитие производственного потенциала угольной промышленности" для повышения эффективности промышленности также могут быть реализованы следующие мероприятия [13] (на законодательном уровне):

- упрощение порядка разрешений на проведение новых исследований в области разработок угольной энергетики и улучшение механизмов их инвестирования;
- повышение квалификации работников на базе новых технологий;
- реструктуризация контроля производственных предприятий за устранением нарушений безопасности труда;
- введение в систему оплаты труда поощрений за соблюдение техники безопасности труда.

По энергетической стратегии [8] в стране ожидается увеличение производства тепловой и электрической (первичной) энергии на 27-28% с 2010 по 2035 год. Скорее всего, это приведёт к значительному увеличению экологической нагрузки на все компоненты окружающей природной среды. Помимо этого множество станций нуждается в переоборудовании устаревших систем энергетических систем (котлы, турбины, очистные сооружения). Поэтому, государство планирует направить инвестиции (в том числе) на очистную технику системы по обеспечению пылеподавления. Следовательно, это – хорошая возможность для испытания новых технологий очистки на энергетических предприятиях.

Перечисленные нововведения в комплексе с мероприятиями по сокращению образования отходов производства и безопасного обращения с ними с последующей утилизацией (малоотходное, безотходное производство), рекультивации земель; экономией энергии и повышением эффективности её использования позволит снизить экологический ущерб от производства, а также будет стимулировать развитие угольной промышленности [8, 15].

1.2 Парижское соглашение и будущее угля

Отдельно следует отметить Парижское соглашение, которое было принято сторонами Рамочной Конвенции Организации Объединённых наций и Евросоюзом в 2015 году взамен Киотского протокола, подписано Россией в

2016 году и ратифицировано в 2019 году.

Суть Парижского соглашения, которое действует с 2020 года, заключается во введении регулирующих мер по снижению эмиссии углекислого газа в атмосферу для предотвращения роста глобальной средней температуры ниже, чем на 2 °С.

Это означает, что Евросоюз (ЕС) собирается облагать пошлиной товары (начиная с 2023 года), при производстве которых количество парниковых газов в пересчёте на CO₂ будет превышать определённые нормы (по объёмам поставляемой в Европу продукции и неким «коэффициентам» загрязнения).

При этом каждый поставщик в Европу будет классифицированным по шкале от стоимости товара. То есть любой зарубежный поставщик всегда будет менее конкурентоспособным, если аналогичный будет в ЕС.

Таким образом, за счёт инвестиций с налогов европейские страны смогут «декарбонизовать» своё производство и перейти на «зелёную» энергетику.

Для нашей страны подобные нововведения могут произойти с «обратным» эффектом. Так как около 40% поставок (нефть, газ, уголь, минеральные удобрения и т.д.) в Европу составляет экспорт России, то 1/3 отечественных компаний (в том числе угольных предприятий) пострадает от введения «углеродного» налога. Подобная ситуация может сложиться в США, Индии, Китае и других странах, энергетика которых базируется на традиционном топливе [16].

Университетом Оксфорда была опубликована статистика по выбросам за 2018 год (рисунок 3). Она наглядно демонстрирует, что Россия наряду с США, Китаем и Индией имеет высокие концентрации эмиссий CO₂.

Однако, зарубежными странами не учитывается наше территориальное расположение и специфика производства сырья. Ведь, часть выбросов, выделяемых отечественными предприятиями, частично поглощается природой: большими территориями лесов, полей; реками.

Поэтому необходима собственная методика оценки эмиссии парниковых газов для более объективной оценки загрязнений [17].

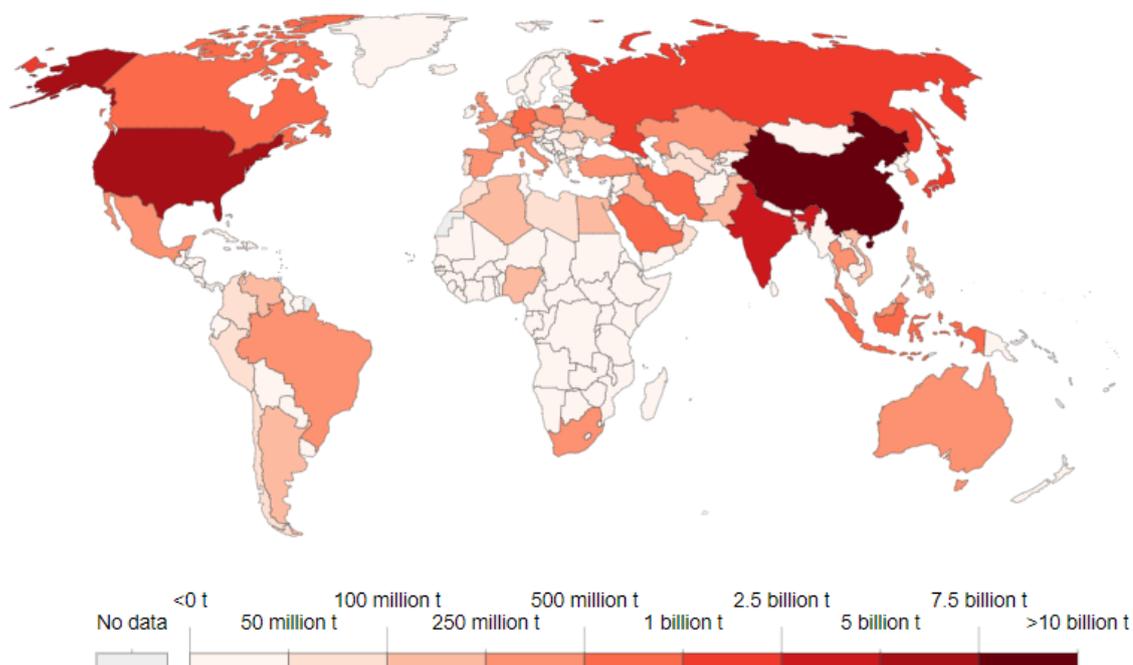


Рисунок 3 – Выбросы CO₂ за 2018 год в тоннах

К тому же противники угольной энергетики зачастую игнорируют процессы образования других газов с более опасными свойствами, чем углекислый газ, а именно метана и водяного пара.

Например, при сжигании природного газа происходит выброс большого объёма водяного пара, вследствие чего запускаются процессы образования массивных снегопадов и ливней, последствия которых однозначно наносят убытки европейским странам [18].

Также не стоит забывать, что за почти полмиллиона лет на Земле без участия деятельности человека глобальное потепление происходило около 3-4 раз, после чего постепенно возвращалось к прежним значениям. Это неоднократно подтверждалось исследованиями проб льда в Антарктиде, которые также акцентировали на то, что увеличение концентрации CO₂ в атмосфере является именно следствием повышения средней температуры планеты, а не причиной.

Дело в том, что в мировом океане концентрация углекислого газа в 80-100 раз больше, чем в атмосфере, а по мере повышения температуры воды

происходит его непрерывное выделение [19].

Это явление наряду с относительным движением Солнца и Земли и другими сложными астрономическими процессами формирует циклический характер климата, которые косвенно связаны с антропогенной деятельностью человека (техногенным воздействием).

Ученые по геологическим данным заключили, что в настоящее время происходит завершение ещё одного цикла потепления, после которого опять последует похолодание. Аналогичного мнения придерживаются американские астрономы, проведя 20-летнее исследование по динамике излучения звёзд (около 30-ти аналогов) подобных нашей, и в результате спрогнозировав снижение интенсивности излучения Солнца до 2050 года [20].

Наиболее опасным и реальным фактором, который не связан с природными явлениями и приносит значительный вред окружающей среде, является тепловое загрязнение. Это подтверждается законом сохранения энергии: вся энергия, произведённая человеком, преобразуется в её тепловой вид, после чего рассеивается в атмосфере, в ходе чего происходит нагрев окружающей среды. Следовательно, такой процесс является справедливым как для альтернативных, так и для традиционных источников энергии, то есть с позиции теплового загрязнения их воздействие одинаково. Например, работа ГЭС, считающаяся «экологически чистой», в итоге так же приводит к генерации тепловой энергии из её электрического вида, как и работа ТЭС – из химической энергии угля.

Таким образом, увеличение негативного воздействия на экологию связано с ростом мирового энергетического потребления, которое с годами будет только возрастать. График, составленный ИНЭИ РАН по данным МЭА, МВФ, демонстрирует темпы роста энергопотребления (рисунок 4) [22].

Необходимо совершенствовать технологии генерации энергии и повышать эффективность её использования, а не изменять способы (если они являются надёжными) её получения [21].

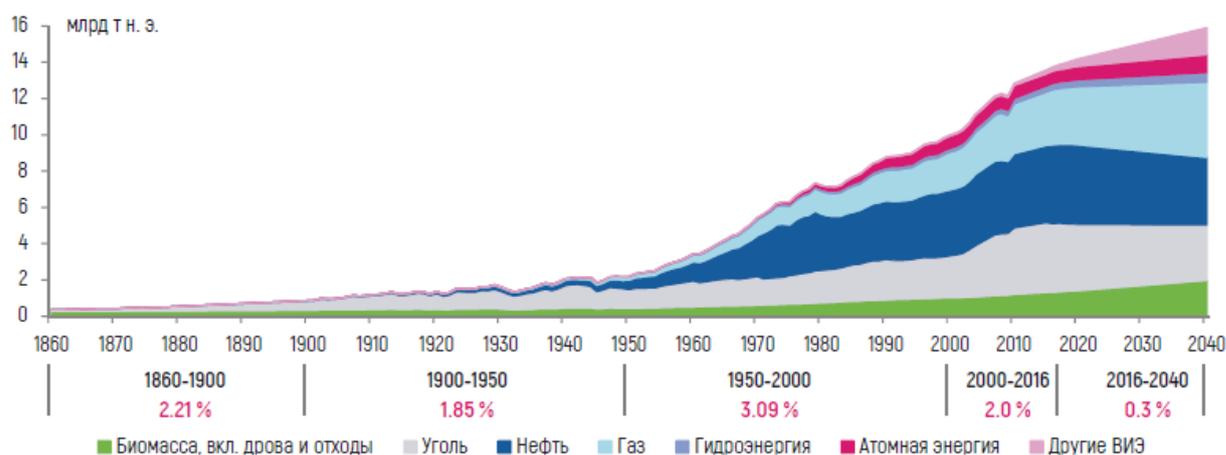


Рисунок 4 – Объемы мирового энергопотребления по видам топлива и темпы роста энергопотребления

В сложившихся обстоятельствах представляется три сценария развития энергетики (в том числе угольного сектора): консервативный, инновационный и сценарий энергоперехода. На рисунке 5 показано потребление энергии по видам топлива в зависимости от разных сценариев.

Консервативный сценарий предполагает сохранение текущих трендов (технологии, подходов к производству энергии и т.д.). России в таком случае грозит: раннее наступление нехватки ископаемых природных ресурсов; замедление роста ВВП с 1,7% до 0,6% в год в результате отсутствия капиталовложений в отрасли; уменьшение объёмов экспорта топлива на 16%; уменьшением производства первичной энергии на 8% (с 2016 по 2040 года) [22].

Инновационный сценарий предполагает ускорение развития технологий и снятие препятствий на пути их международного трансфера. Данный сценарий предполагает усиление уже принятых национальных приоритетов в продвижении возобновляемых источников энергии или модернизации традиционных видов энергии, поддержке электротранспорта, стимулировании энергоэффективности. В такой парадигме Россия может сохранить авторитет на мировой арене и отстаивать свои интересы в области традиционной энергетики, в случае её преобразования в рамки современных тенденций [22, 25].

В сценарии *Энергоперехода* происходит дополнительное ускорение научно-технического прогресса и фокусировка энергополитики всех стран на целях декарбонизации. В этом сценарии приоритет всегда у без- или низкоуглеродных технологий. У России в таком варианте событий есть некоторые перспективы в области продаж «синего» и «бирюзового» водорода. Однако, необходимо иметь совершенные технологии улавливания углекислого газа, иначе страна будет попадать под излишний «углеводородный» налог в Европе, следовательно, рентабельность будет снижаться. Этот вектор имеет второстепенный характер и будет востребованным при наличии дополнительных инвестиций. Основным направлением остаётся традиционная энергетика [22-24].

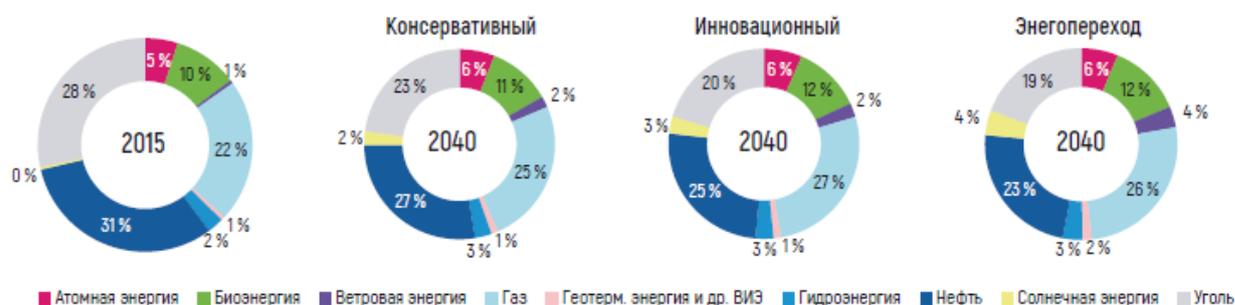


Рисунок 5 – Структура потребления первичной энергии по видам топлива в мире в 2015 и 2040 гг. по различным прогнозам

Таким образом, традиционная энергетика ещё долгое время будет сохранять ведущую роль в ТЭБ, несмотря на текущие тренды.

Угольную промышленность в случае грамотной модернизации отрасли, характеризующейся переходом от стандартной тепловой энергетики к энерготехнологии и более чистому производству, ожидает хорошее будущее. Для реализации этого следует придерживаться принципа когенерации двух составляющих: производства тепловой энергии и продуктов из углерода, что может оказаться эффективней параллельной выработки тепловой и электрической энергии (производство) [18, 25].

Перспективными направлениями такого подхода являются: технология частичной газификации, производство полезных продуктов из ЗШО. Для осуществления второго – необходимо организовать эффективную

систему утилизации ЗШО и усовершенствовать технологии золоулавливания [18].

1.3 Выбросы ТЭС на твёрдом топливе

ТЭС – является самым крупным энергетическим объектом, который использует твёрдое топливо. Необходимо рассмотреть, какие выбросы осуществляются станцией. Таким образом, сложится представление об экологических проблемах угольной энергетики, и в дальнейшем можно будет определить средства по устранению выявленных недостатков.

В первую очередь выделяют *глобальное (общее)* и *локальное* выбросы вредных веществ.

К *локальным* выбросам ТЭС относят те вещества, которые распространяются от 20 до 50 км от источника загрязнения. Такие выбросы вызывают следующие последствия: отходы и загрязнение воздуха, почвы и водных источников.

К *глобальным* – на всю биосферу с учётом выбросом остальных предприятий. Последствия имеют масштабный характер: изменение климата, деградация биосферы, дисбаланс воды.

В совокупности эти выбросы приводят к: заболеваниям человека, нестабильности климата (отступление вечной мерзлоты, бури, наводнения и т.д.), ухудшению условий и качеству жизни.

Также существует следующая классификация веществ по их влиянию на организм человека [26]:

- «1-й – вещества чрезвычайно опасные;
- 2-й – вещества высокоопасные;
- 3-й – вещества умеренно опасные;
- 4-й – вещества малоопасные;
- 5-й – практически неопасные».

В таблице 1 представлены нормы различных показателей для классов вредных веществ [26].

Таблица 1 – Класс опасности вредных веществ от показателей

Наименование показателя	Нормы для класса опасности			
	1-го	2-го	3-го	4-го
Предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ в воздухе:				
Рабочей зоны мг/м ³	Менее 0,1	0,1-1	1,1-10	Более 10
Средняя смертельная доза при введении в желудок, мг/кг	Менее 15	15-150	151-5000	Более 5000
Средняя смертельная доза при нанесении на кожу, мг/кг	Менее 1000	100-500	501-2500	Более 2500
Средняя смертельная концентрация в воздухе, мг/м ³	Менее 500	500-5000	5001-50000	Более 50000
Коэффициент возможности ингаляционного отравления (КВИО)	Более 300	30-300	3-29	Менее 3
Зона острого действия	Менее 6	6-18	18,1-54	Более 54
Зона хронического действия	Более 10	5-10	2,5-4,9	Менее 2,5

Из таблицы 1 следует, что концентрации веществ 1-2 класса обладают большой зоной хронического воздействия и ощутимой зоной острого воздействия, что может привести к летальному исходу сотрудников (остановка дыхания и др.) на предприятиях или вызвать у них ряд осложнений. К ним относятся: изменения состава крови (снижение уровня гемоглобина), повреждение костных тканей, заболевания печени, раздражение слизистых оболочек (нос, горло, глаза), ожоги, злокачественные опухоли и нарушения иммунной системы [27].

Для фиксирования количества загрязнений существуют три параметра. Параметры ПДК, характеризующих содержание вещества в приземном слое атмосферы: *максимально-разовая* ПДК_{мр}, определяемая в пробах в течение 20 мин, и *среднесуточная* ПДК_{сс} средневзвешенная за 24 ч

ПДК определяется на уровне дыхания человека. Параметр ПДВ, характеризующий кол-во выбрасываемых веществ, произведённых станций, на устье источника выбросов (нормативы представлены в разделе 2.5) [28].

В соответствии выше приведённых сведений составлена таблица 2 опасных веществ, содержащихся в выбросах ТЭС [28].

Таблица 2 – Значение ПДК для веществ, содержащихся в выбросах ТЭС

Вещество	ПДК _{м.р.} , мг/м ³	ПДК _{с.с.} , мг/м ³	Класс опасности
Диоксид азота NO ₂	0,085	0,04	2
Оксид азота NO	0,6	0,06	3
Диоксид серы SO ₂	0,5	0,05	3
Бенз(а)пирен C ₂₀ H ₁₆	–	0,1 мкг/ 100 м ³	1
Пентаоксид ванадия V ₂ O ₅	–	0,002	1
Сажа	0,15	0,05	3
Оксид углерода CO	5	3	4
Аммиак NH ₃	0,2	0,04	4
Сероводород H ₂ S	0,008	–	2
Пыль неорганическая, содержащая диоксид кремния, %	0,15	0,05	3
>70			
20-70	0,3	0,1	3
<20	0,5	0,15	3
Угольная зола ТЭС*	0,05	0,02	2

По таблице 2 видно, что наиболее опасными веществами являются диоксид азота NO₂, бензапирен C₂₀H₁₆, пентаоксид ванадия V₂O₅, сероводород H₂S и угольная зола.

Также по [29] установлено, что на оксиды серы приходится до 50% всех выбросов (SO₂+SO₃), на оксиды азота – 40%.

Вредные вещества можно разделить на два класса с учётом разнообразия технологий сжигания топлива [28-30]:

- первый класс – вещества, выброс которых слабо зависит от технологии сжигания. К таким веществам относятся, например, *пентаксид ванадия, диоксид серы* и др.;
- второй класс – вещества, выброс которых изменяется в зависимости от технологии сжигания (мощность энергоблока, коэффициент избытка воздуха,

вид топочного устройства и т.д.). К таким веществам относятся, например, *оксид углерода, оксиды азота, летучая зола, бензапирен и др.*

Из выше сказанного следует, что необходимо контролировать концентрацию этих веществ в атмосфере путём их улавливания или изменения технологии сжигания топлива.

Одним из эффективных направлений в области изменения технологии сжигания топлива является безотходное производство. Например, существуют разработки, предлагающие введение замкнутых потоков газа. Но, к сожалению, такие мероприятия являются многозатратными (так как необходима реконструкция многих элементов энергоблока), не имеют значительного опыта эксплуатации и плохо проверены на надёжность. Определённо нужно развивать и внедрять эти технологии. Но на данный момент по причине надёжности и относительно малых затрат на оборудование ведущим направлением предотвращения выбросов являются очистные системы дымовых газов (в частности золоуловители), которые в основном нацелены на летучую золу, содержащую опасные примеси (бериллий, пентаоксид ванадия и др.).

Как правило, под очисткой газа понимается химическая нейтрализация загрязняющего вещества или его отделение от газа [31].

В исследовании [32] была рассмотрена работа ТЭС мощностью около 2,5 млн. кВт. Было установлено, что при потреблении 20 тыс. тонн угля за сутки выбросы оксидов серы в 34 раза превышают массу топлива, оксиды азота – 10 раз, а зола, пыль и сажа в совокупности – в 8-10 раз при работе очистительных устройств (для серы, азота и золы).

Данный пример демонстрирует, что не все энергетические объекты обладают качественными системами очистки дымовых газов, поэтому необходимо их усовершенствование.

Основными требованиями для создания экологически чистых тепловых электростанций являются [28-32]:

- ср. концентрация оксидов серы (SO_x) – не более 200...300 мг/нм³;

- ср. концентрация оксидов азота (NO_x) – не более 150...200 мг/нм³;
- ср. концентрация золовых частиц – не более 50 мг/нм³;
- очищение жидких стоков от ТЭС – 100%;
- доля используемой золы и других твердых отходов – не менее 80%.

Однако оксиды азота и серы совмещаются с пылью, сажей и прочими примесями, что затрудняет оценить их точный уровень вреда для человека.

Таким образом, оценён масштаб проблем угольной энергетики, в частности систем очистки дымовых газов. Предложены варианты по их решению, одним из которых является – усовершенствование систем очистки дымовых газов (в данной работе: золоуловителей).

2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ОТ ЗОЛЫ

2.1 Свойства золы

Для анализа методов очистки дымовых газов необходимо рассмотреть свойства золы, от которых зависит работа очистительных устройств.

Свойства золы подразделяют на два класса [33]:

- первый класс – те, свойства, которые входят в качестве основных расчётных величин при определении способности улавливания (проектировании) очистительных аппаратов (*плотность, дисперсный состав, электрическое сопротивление*);
- второй класс – те, свойства, которые влияют на эффективность и надёжность работы золоулавливающих аппаратов (*слипаемость, смачиваемость, абразивность*).

Плотность – отношение массы частицы к её объёму (в том числе учитывается объём пор и газовых включений), кг/м^3 . Данная величина является ключевой при определении скорости дрейфа частиц.

Дисперсный состав частиц – содержание количества частиц разного размера (фракций) во всём объёме частиц, получаемого при сжигании топлива. Распределение по фракциям происходит по логарифмической зависимости. Частицы диаметром 10-30 мкм составляют большую часть массы золы (около 80%). Этот параметр варьируется в зависимости от типа угля.

Электрическое сопротивление – свойство частиц препятствовать прохождению электрического тока. Данная величина является основной при определении конструктивных характеристик электрофильтров (золоулавливающие аппараты, которые рассмотрены ниже).

Выделяют три группы сопротивления частиц:

- низкоомная ($\rho < 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) – частицы не улавливаются;
- среднеомная ($10^2 < \rho < 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) – частицы хорошо улавливаются в

электрофилтрах;

- высокоомная ($\rho > 10^8$ Ом·м) – частицы являются диэлектриками и практически не улавливаются;

Слипаемость – способность частиц образовывать малоподвижные «конгломераты» (суспензия золы); характеризует способность золы сыпаться. Зола с высокой слипаемостью плохо «сыпается» с поверхностей осаждения, и требует принудительного удаления.

Смачиваемость – способность золы впитывать влагу. Зола с высокой смачиваемостью хорошо смывается водой с поверхностей осаждения.

Абразивность – способность золы истирать материалы: металл и т.д. (чем выше абразивность золы, тем сильнее износ материалов). Максимальный износ материал вызывают частиц с диаметром около 90 мкм.

2.2 Золоуловители отечественных ТЭС (используемые и внедряемые)

В первую очередь стоит отметить, что в совокупности выделяют *сухие, мокрые и мокросухие* методы очистки газов [34-36].

Всего на российских электростанциях применяется четыре типа золоуловителей (все приведённые ниже аппараты размещаются после котельного оборудования и перед дымососом):

- *Аппараты сухой инерционной очистки газов* (прямоточные циклоны, батарейные циклоны). Эффективность очистки составляет $\eta = 82-90\%$. Батарейный циклон является единственным аппаратом, применяющимся в качестве основного устройства на мазутных ТЭС для очистки дымовых газов. В настоящее время эти устройства меньше используются на ТЭС, так как мазутное топливо постепенно уходит из ТЭБ. В общем случае циклоны, как самые простые золоулавливающие устройства, в основном применяется в качестве оборудования для сепарации пыли в системах пылеприготовления;
- *Аппараты мокрой очистки газа* (скруббер ВТИ, скруббер Вентури, эмульгаторы). Эффективность очистки составляет $\eta = 88-96\%$ (для скрубберов), $\eta = 99,5-99,9\%$ (для эмульгаторов);

- *Электрофильтры.* Эффективность очистки составляет $\eta=99,5-99,9\%$. Являются первыми устройствами, которыми была достигнута высокая эффективность очистки. Имеют большие габариты, и, как правило, размещаются в пристройке к котельному цеху;
- *Рукавные фильтры.* Эффективность очистки составляет $\eta=99,5-99,9\%$. В отечественной энергетике технология рукавных фильтров появилась относительно недавно. Такие устройства эксплуатируются только на двух российских станциях, одной из которой является Омская ТЭЦ-5 (станционный котёл №9), работающая на Экибастузском угле. Так же как и электрофильтр имеют большие габариты, так как размещаются в коробах (рисунок 6).



Рисунок 6 – Рукавные фильтры Омской ТЭЦ-5

Рассмотрим описанные устройства более подробно.

2.2.1 Циклоны

Циклон – устройство, очищающее дымовой газ от загрязненных частиц за счёт центробежных (инерционных) сил (сухой метод очистки).

Типичная схема циклона представлена на рисунке 6 [35].

Циклон представляет цилиндрическую конструкцию с подведённым входным патрубком, по которому поступает загрязненный газ. Далее этот газ попадает в корпус (или пыле осаждающую камеру), где происходит процесс золоулавливания за счёт закручивания загрязнённого потока газа: на взвешенные частицы в результате закрутки потока действуют центробежные силы, отбивающие частицы к образующим поверхностям корпуса; далее под действием силы тяжести уловленные частицы «сыпаются» по стенкам корпуса и конической части устройства в бункер пыли. Очищенный газовый поток разворачивается и идёт по выхлопной трубе в дымосос.

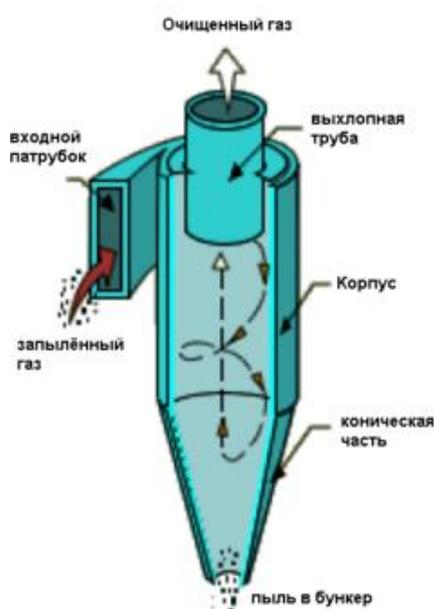


Рисунок 6 – Схема типичного циклона

Циклоны надёжно работают только с теми потоками газа, где загрязнённые частицы имеют одинаковый диаметр (что редко встречается в золе уноса). В других случаях наблюдаются различные кинематические характеристики, что сказывается на параметре золоулавливания (варьирование степени очистки в зависимости от размера частиц).

Также в эффективности очистки циклона большую роль играет отношение диаметров корпуса D (проходное сечение пыле осаждающего пространства) и выхлопной трубы D_0 по причине разности скоростей

потоков. Чем больше отношение $D-D_0$, тем выше эффективность устройства [35].

С другой стороны, существуют батарейные циклоны, которые нивелируют некоторые недостатки стандартного циклона.

Конструкция аппарата представлена на рисунке 7 [35].

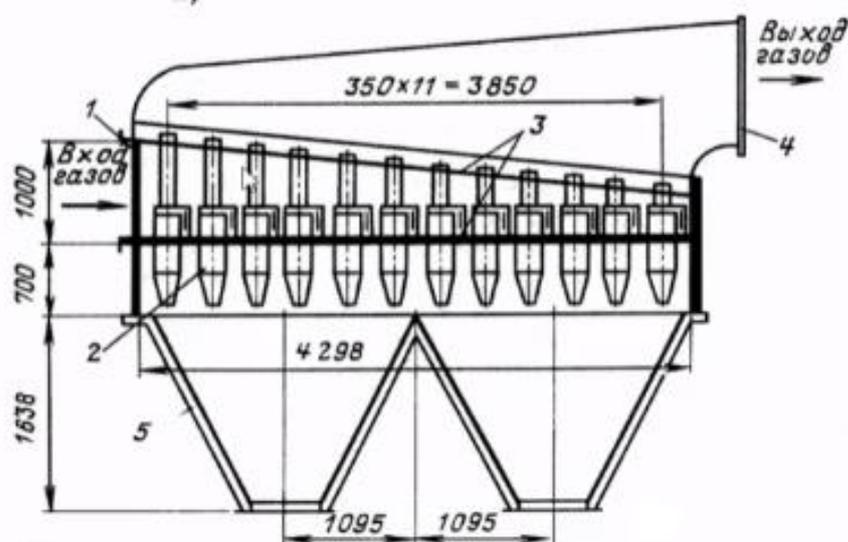


Рисунок 7 – Схема батарейного циклона с типовыми размерами в мм, где:

1 – входной патрубок запылённого газа, 2 – циклонный элемент, 3 – трубные доски, 4 – выходной патрубок очищенного газа, 5 – бункер для золы.

Суть устройства заключается в том, что множество небольших циклонов (в данном случае прямооточных: по направлению потока очищенного газа) устанавливается внутри пространства для улавливания частиц. Сужением пространства обеспечивается равномерная нагрузка (наполнение) циклонов (т.е. у последнего циклона формируется «плотный» газовый поток, который сопоставим с размером улавливающих элементов текущего циклона). Трубными досками 3 обеспечивается надёжность и герметизация конструкции.

Зола, улавливаемая в циклонах, должна обладать низкой слипаемостью и абразивностью, для предотвращения: скопления золы в элементах с небольшим диаметром (выходной патрубок) с последующим засорением, износа поверхностей устройства и изменения кинематических характеристик оборудования.

Преимущества циклонов:

- простота конструкции;
- широкий спектр применения (во второстепенных системах);
- небольшие габариты;
- большой опыт эксплуатации (надёжность);
- относительная дешевизна технологии.

Недостатки циклонов:

- низкая эффективность очистки;
- большая зависимость степени очистки от фракционного состава золы (несовершенство конструкции).

2.2.2 Электрофильтры

Электрофильтр – устройство, очищающее дымовой газ от загрязнённых частиц за счёт электрических сил зарядов (сухой метод очистки).

Принципиальная схема работы электрофильтра представлена на рисунке 8 [36].

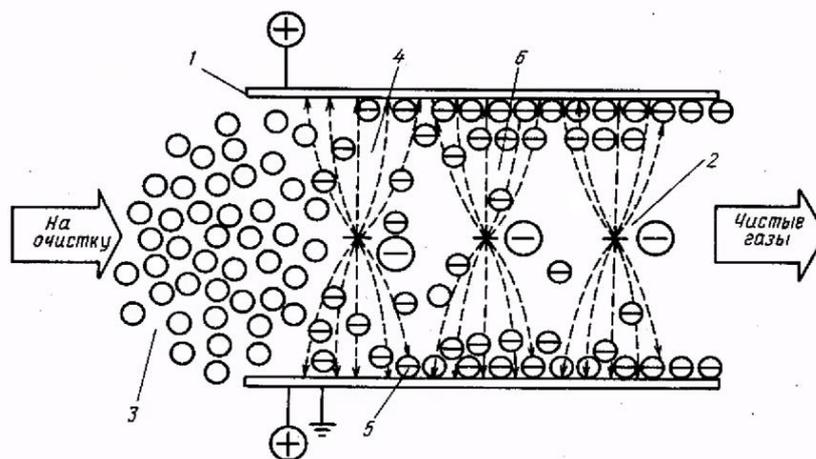


Рисунок 8 – Принципиальная схема работы электрофильтра, где:

- 1 – осаждающий электрод, 2 – коронирующий электрод, 3 – частицы золы, 4 – электрическое поле, 5 – слой осевшей золы, 6 – заряженная зола.

Механизм работы устройства заключается в следующем. Запылённый поток газов 3 движется к канаве, образованной осаждающими электродами

1, и расположенными на определённом расстоянии друг от друга коронирующими электродами 2. На осаждающий и коронирующий электроды подаётся высокое напряжение постоянного тока: положительный заряд – на осаждающий электрод 1, отрицательный заряд – на коронирующий электрод 2. В результате внутри этого пространства образуется электромагнитное поле 4, силовые линии которого показаны на рисунке 8. (чем выше разность потенциалов, тем выше напряжённость электромагнитного поля). Внутри этого пространства образуется «ударная ионизация» газов: частицы золы 3 приобретают заряд и начинают двигаться в соответствии с зарядом в сторону осаждающего 1 или коронирующего электрода 2. Этот процесс называется «коронным зарядом» или «током короны». Частицы золы 3 приобретают заряд внутри ионизированного пространства с одной стороны за счёт адсорбции заряженных частиц на поверхности, с другой стороны – внутренней электропроводимости (так как частицы золы в основном состоят из оксидов металлов). Большинство частиц золы 3 приобретают отрицательный заряд, меньшинство – положительный заряд. Частицы 3 начинают постепенно притягиваться к электродам противоположного знака, и после удаляются с поверхности электродов (механизмом встряхивания электродов) в систему ГЗУ.

Таким образом, можно выделить ключевые этапы работы электрофильтра: ионизация пространства, процесс заряда частиц, движение частиц к электродам, удаление накопившейся золы с поверхности электрода.

Если у поверхности осаждающего электрода накопится большое количество отрицательно заряженных частиц золы, то могут создаться условия, при которых заряженные частицы золы создают собственное электромагнитное поле. В таком случае все частицы, оказавшиеся внутри новообразованного поля, меняют свой заряд противоположный знак. Следовательно, частицы начинают двигаться в сторону коронирующего электрода, по пути сталкиваясь с вновь уловленной отрицательно

заряженной золой. В результате соударения частиц противоположных «знаков» происходит потеря заряда, и зола пролетает мимо электрофильтра (доля проскока/уноса). Описанное явление называется «обратной короной» [36].

Поэтому необходимо своевременно удалять золу с поверхностей электрода, а также поддерживать высокую разность потенциалов (напряжённость) между коронирующим и осаждающим электродами.

Рассмотрим следующие особенности технологии на примере электрофильтра типа УГ (унифицированный горизонтальный) (рисунок 9), состоящего из трёх полей [36].

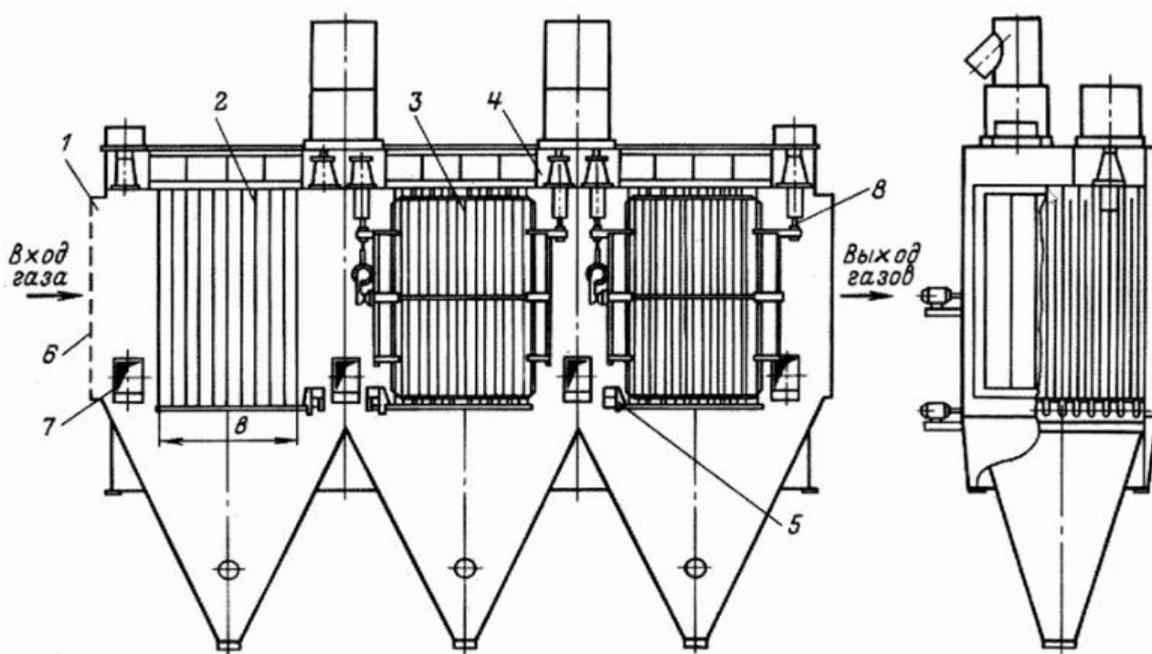


Рисунок 9 – Трёхпольный электрофильтр типа УГ, где:

1 – корпус, 2 – осаждающий электрод, 3 – коронирующий электрод, 4 – механизм встряхивания коронирующего электрода, 5 – механизм встряхивания осаждающих электродов, 6 – газораспределительная решётка, 7 – бункер для золы, 8 – изолятора.

Чем дальше по ионизированному пространству двигаются заряженные частицы золы, тем труднее их уловить по причине увеличивающихся требований к напряжённости поля. Поэтому электрофильтры выполняют в многопольном виде (рисунок 9) или добавляют дополнительные ярусы при больших мощностях энергоблока (например, ЭГД – горизонтальный двух ярусный электрофильтр).

Также важным элементом электрофильтра является газораспределительная решётка б, которая обеспечивает выравнивание поля скорости электрофильтра.

Механизм встряхивания 4 и 5 работает за счёт электродвигателя, крутящего вал с молотками. Молотки ударяют по наковальням, присоединённым к поверхностям электродов, тем самым встряхивая их, вследствие чего удаляется зола.

На рисунке 10 изображены важные зависимости, влияющие на работу электрофильтра [37].

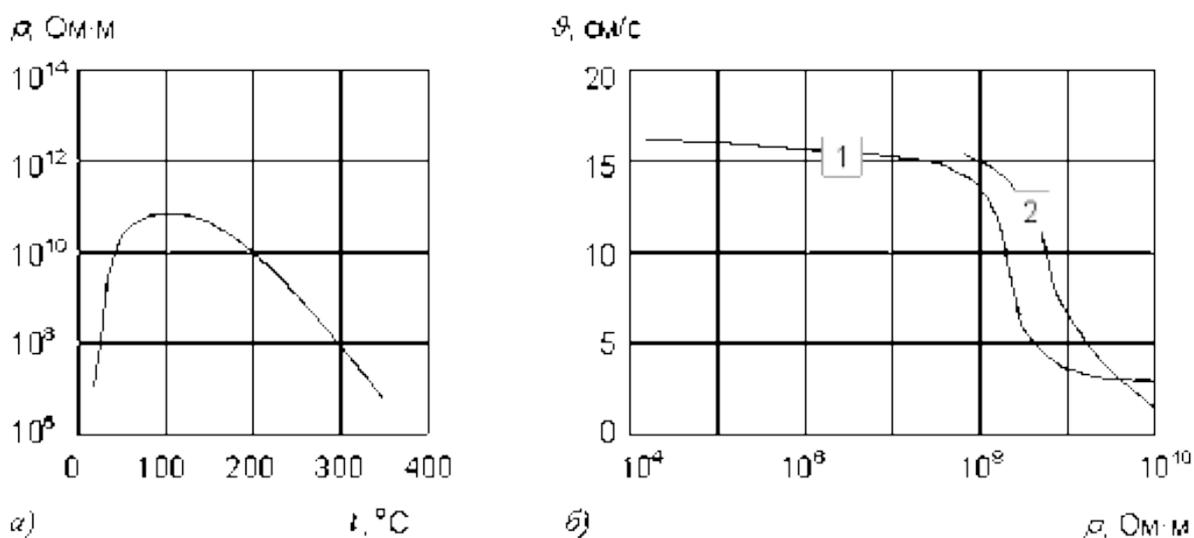


Рисунок 10 – а) Зависимость электрического сопротивления золы ρ от температуры уходящих газов t ; б) зависимость скорости дрейфа частиц v от электрического сопротивления золы ρ , где:

1 – цементная пыль, 2 – летучая зола котлов.

По рисункам можно установить, что в электрофильтрах хорошо улавливается среднеомная зола ($10^2 < \rho < 10^8$ Ом·м), так как сохраняется высокая скорость дрейфа частиц (коррелирующая с эффективностью золоулавливания).

Другой момент заключается в том, что нужное электрическое сопротивление золы достигается при температурах дымовых газов выше или ниже распространённых температурных условиях работы топок энергетических котлов (120-140 °С).

Стоит заметить, что при понижении температуры дымовых газов ниже $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, произойдёт конденсация дымовых газов, что в последствие вызывает коррозию последующих элементов газового тракта, а при излишнем повышении – увеличиваются тепловые потери в окружающую среду. Поэтому следует сохранять оптимальный баланс между этими параметрами. Данный подход называется температурным кондиционированием.

На рисунке 11 эффективность улавливания золы в зависимости от её фракционного состава [37].

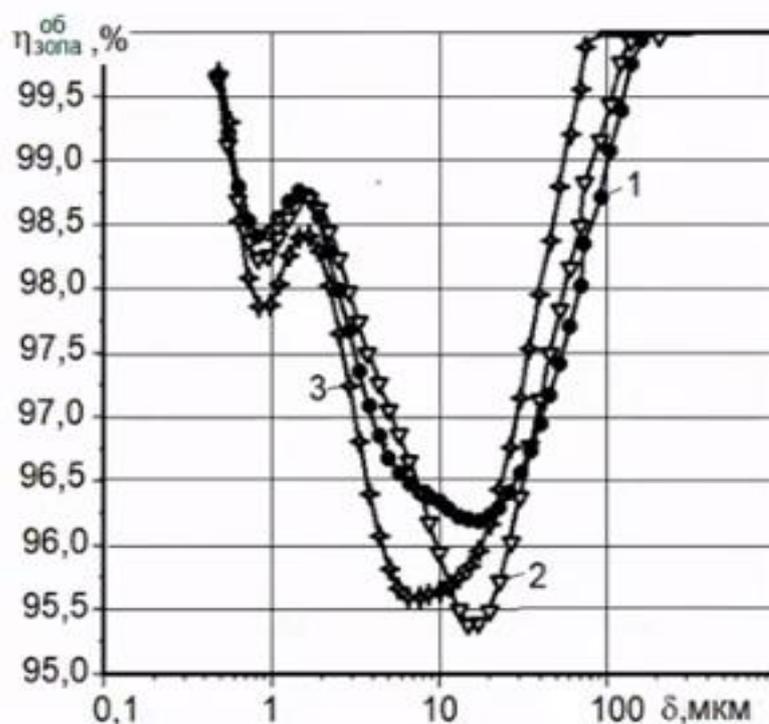


Рисунок 11 – Эффективность улавливания фракций летучей золы, где:

1,2,3 – температура уходящих дымовых газов $\vartheta=90,110,130\text{ }^{\circ}\text{C}$.

По зависимости 11 установлено, что наихудшая степень улавливания золы наблюдается у частиц диаметром около 10 мкм. Поэтому эта фракция золы в большей степени может уноситься в окружающую среду.

Преимущества электрофильтров:

- высокая степень очистки (даже при фракции частиц 10 мкм);
- большой опыт эксплуатации (надёжность);

- малая зависимость эффективности очистки от фракционного состава золы.

Недостатки электрофильтров:

- большие габариты конструкции;
- высокие требования к источнику питания;
- явление «обратной короны»;
- высокая зависимость от электрической сопротивляемости золы и температуры уходящих дымовых газов.

2.2.3 Скрубберы

Скруббер – устройство, очищающее дымовой газ от загрязненных частиц за счёт центробежных сил с преобразованием загрязненных частиц в «конгломераты» (мокрый метод очистки).

Различают два основных типа скрубберов, используемых в отечественной энергетике: скруббер ВТИ (Всесоюзного Теплотехнического Института) (степень очистки $\eta=88-90\%$) (рисунок 12а) и скруббер Вентури (степень очистки $\eta=94-96\%$) (рисунок 12б) [38].

Принцип работы схож с технологией циклонов, однако, присутствуют конструкторские различия: в цилиндре отсутствует выхлопная труба (для сравнения рисунок 6 и рисунок 12); провод запылённых газов осуществляется через прутковую решётку из стали (прутки размещены в шахматном порядке) (рисунок 12 область 1го элемента); наличие форсунок, впрыскивающих воду (рисунок 12б элемент 2); в скруббере Вентури (рисунок 12б) входной патрубок выполнен в виде одноимённой трубы, составленной из конфузора, горловины и диффузора [38].

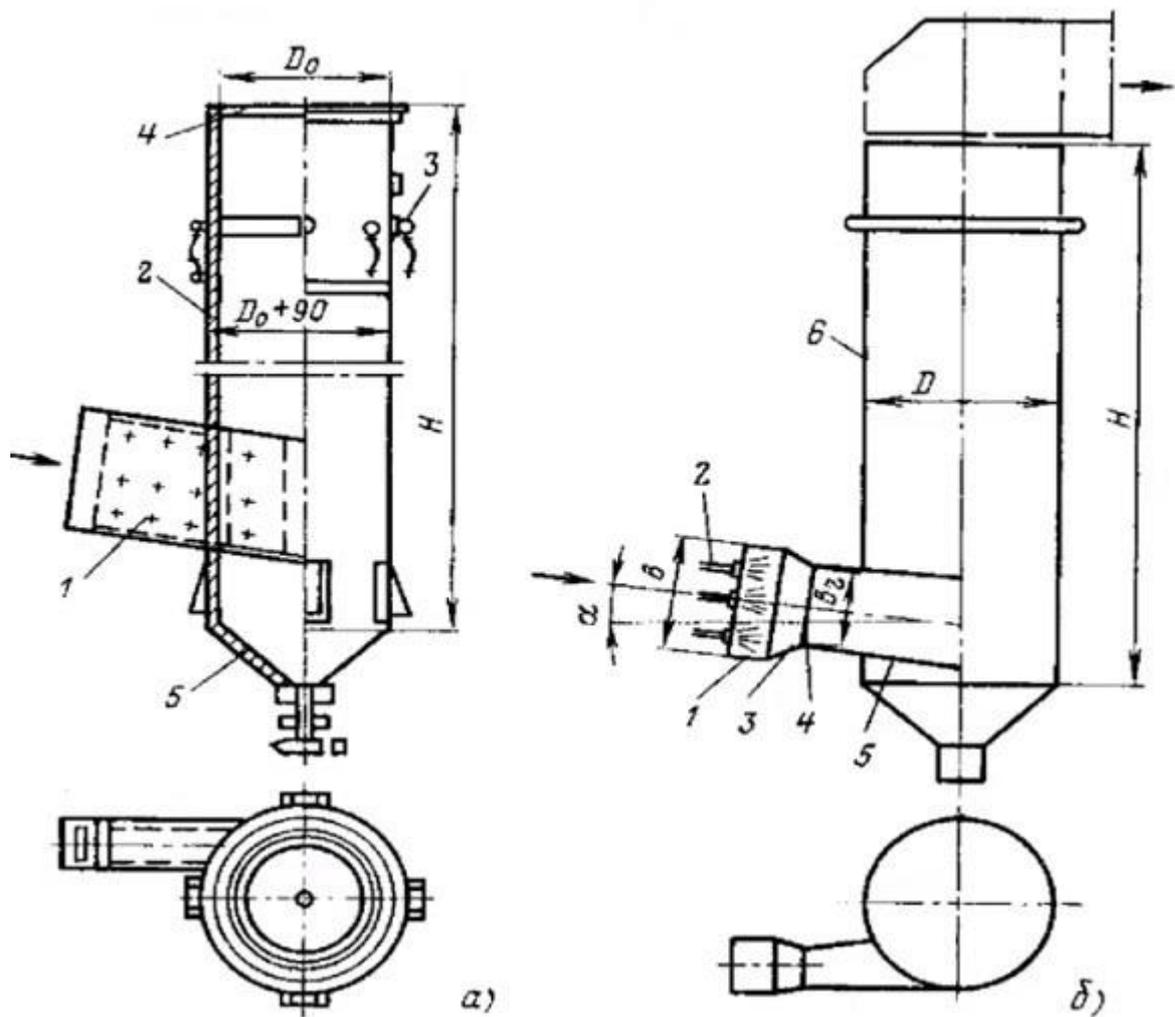


Рисунок 12 – а) Скруббер ВТИ; б) скруббер Вентури, где:

а: 1 – входной патрубок запылённого газа, 2 – корпус золоуловителя, 3 – оросительные сопла, 4 – выход очищенного газа, 5 – бункер;

б: 1 – входной патрубок запылённого газа, 2 – подача воды через оросительные сопла, 3,4,5 – конфузор, горловина и диффузор коагулятора Вентури, 6 – скруббер-каплеуловитель.

Таким образом, в скруббере ВТИ (рисунок 12а) запыленный газ вместе с распыляемой из форсунок водой, направляясь к прутковой решётке, проходит по входному патрубку. Прутковая решётка, орошаемая водой из форсунок, обеспечивает турбулизацию потока, вследствие чего частички влаги и пыли начинают интенсивно перемешиваться и образовывать «конгломераты». Полученные частицы («конгломераты») обладают примерно одинаковым диаметром, что хорошо сказывается на

эффективности очистки аппарата. Далее, поток с коагулированными частицами, закручиваясь, поступает в каплеуловитель (или корпус 2) и направляется в верхнюю часть аппарата, где за счёт центробежных сил коагулированные частицы «прилипают» к стенкам корпуса 2. После чего, оросительные сопла 3 смывают эти частицы по стенке вниз в бункер, направляющий субстанцию через гидрозатвор в систему ГЗУ (чем плотнее орошение, тем лучше золоулавливание).

В скруббере Вентури (рисунок 126) каплеуловитель выполнен идентично со скруббером ВТИ, но иначе организован подвод воды. Как было отмечено ранее, запылённый газовый поток проходит по трубе Вентури (конфузор 3 – сужение широкой части, горловина 4, диффузор 5 – расширение узкой части). В соответствии с уравнением Бернулли сначала поток разгоняется, при этом его давление понижается в конфузоре 3, после скорость потока снижается, а давление – возрастает в диффузоре 5. То есть в аппарате осуществляется два механизма перемешивания: первый – изменение скоростей потока в трубе Вентури, второй – турбулизации потоков.

В первом случае перемешивание происходит за счёт разных скоростей движения частиц золы и воды по причине разных плотностей этих элементов. Полученные «конгломераты» сразу «прилипают» к стене корпуса после выхода из диффузора

Во втором – несмешанные частицы в трубе Вентури улавливаются по принципу, описанном выше для скруббера ВТИ.

Сочетание этих механизмов в скруббере Вентури позволяет эффективней производить очистку газа.

Однако в описанных устройствах действует ряд ограничений, связанных с содержанием кальция (по разным данным не более 10-17 %) в золе. Кальций обеспечивает образование трудноудаляемых плотных отложений в конструкции золоуловителя. Это означает, что в узких местах (например, горловине, на прутковой решётке) будет обеспечиваться высокое

сопротивление и сужение проходных сечений, следовательно, будет снижена нагрузка котла из-за недостаточной очистки уходящих дымовых газов [39].

Преимущества скрубберов:

- относительно высокая степень очистки (у скрубберов Вентури);
- большой опыт эксплуатации (надёжность);
- относительно небольшие габариты устройства;
- широкая область применения (система очистки воздуха, золоуловитель).

Недостатки скрубберов:

- образование отложений при очистке газов от золы с высоким содержанием кальция (до 10-17 %);
- сложность технологии;
- возможное уменьшение степени очистки из-за низкой смачиваемости золы;
- высокий расход воды на орошение;
- плохое улавливание частиц диаметров 1-2 мкм.

2.2.4 Рукавный фильтр

Рукавный фильтр – устройство, очищающее дымовой газ от золы за счёт прохождения загрязнённого потока через поры тканевого фильтра («рукава») (сухой метод очистки).

Схема рукавного фильтра представлена на рисунке 13 [40].

Таким образом, принцип работы данного аппарата схожа с бытовым пылесосом, но очистка мешков, переполненных уловленными частицами, осуществляется за счёт «обратной продувки» (процесс на рисунке 14), при которой обеспечивается дутьё воздуха в обратном направлении (против движения загрязнённых газов). После «обратной продувки» частицы под собственным весом сыпаются в бункер, направляясь в систему ГЗУ.

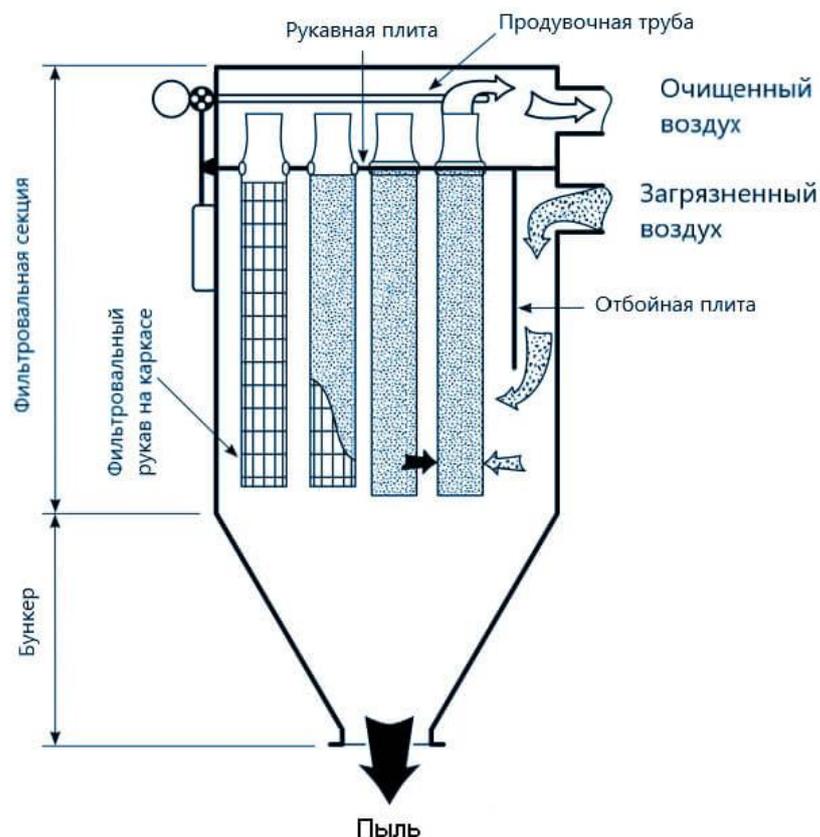


Рисунок 13 – Схема рукавного фильтра



Рисунок 14 – а) Очистка от пыли рукавного фильтра; б) регенерация фильтра сжатым воздухом

По большому счёту эффективность работы рукавного фильтра зависит от «мешка» (тканевого фильтра), который улавливает частицы. Срок эксплуатации тканевого фильтра составляет 4-5 лет. В таблице 3 представлены материалы, из которых изготавливается тканевый фильтр, и их свойства [41].

Таблица 3 – Материалы исполнения рукавных фильтров

Материал	Принятое название	Интервал температур		Разовая стойкость					Относительная цена
		Эксплуатационная	Разовая	Кислота	Щёлочь	Гидролиз	Окисление	Абразивность	
PP	Полипропилен	90	95	5	5	5	3	5	1
PES	Полиэстер	135	150	4	2	1	5	5	1
PAC	Дралон Т	125	140	4	3	3-5	3	3-4	1,6
PE	Полиэфир	150		3	4	4	2		2
PPS	Полифенилсульфид	180	200	4	4	5	1	3	5
APA	Nomex	200	220	1	4	2	3-4	5	5
MA	m-Aramid	200		3	3	3	2		5
PI	Полиимид	240	260	4	2	2	-	4	6
PTFE	Тефлон	230	260	5	5	5	5	3	15
GLS	Фиберглас	240	280	4	3	5	5	1	2-3

* – стойкость растёт от 1 до 5

Из представленных вариантов в таблице 3, наиболее сильными характеристиками обладает полипропилен и тефлон, хотя в первом случае низкий интервал температур, а во втором – высокая цена аппарата.

На рисунке 15 представлен фракционный пропуск золы через электрофильтр и рукавный фильтр [41].

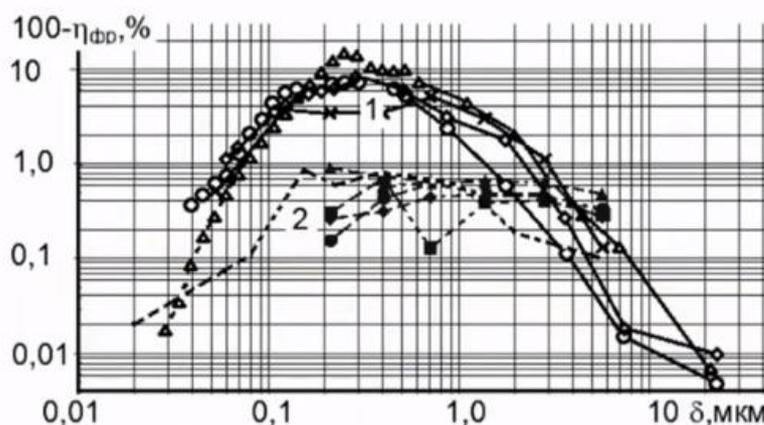


Рисунок 15 – Фракционный пропуск через фильтр (разные линии характеризуют разные котлы и угли), где:

1 – для электрофильтра, 2 – для рукавного фильтра.

По зависимостям на рисунке 15 видно, что в зоне частиц диаметром 10 мкм и меньше рукавный фильтр лучше справляется с улавливанием золы, чем электрофильтр. Для сухих методов очистки это качественный показатель.

Пока что эти устройства являются дорогими, и они редко применяются в энергетике (в основном используются в промышленности для очистки воздуха).

На данный момент в энергетике рукавные фильтры применяются только на Омской ТЭЦ-5 (оборудован 1 энергоблок, взамен двухступенчатой системы: скруббер-электрофильтр) и Рефтинской ГРЭС (оборудовано 2-3 энергоблока). Также в проектировании рассматривается вариант размещения рукавного фильтра в качестве второй ступени очистки после электрофильтра. Такое решение обеспечивает экологически чистую работу станций при использовании сухих методов очистки загрязнённых газов. Но следует учитывать температуры уходящих дымовых газов, так как при слишком высоких температурах – материалы рукавного фильтра могут сгореть.

Преимущества скрубберов:

- высокая степень очистки (при сухом методе);
- относительно небольшие габариты устройства;
- простота технологии;
- независимость эффективности очистки от фракционного состава золы;
- широкая область применения (система очистки воздуха, золоуловитель).

Недостатки скрубберов:

- малый опыт эксплуатации (низкая надёжность);
- необходимость замены фильтрующего материала раз в 4-5 лет;
- дороговизна технологии;
- возможное сгорание фильтра при высоких температурах дымовых газов (свыше 200 °С).

2.2.5 Эмульгаторы

Эмульгатор – устройство, очищающее дымовой газ от золы за счёт создания эмульсионного слоя (из частиц золы и воды) и центробежных сил (мокрый метод очистки).

В основном существуют эмульгаторы батарейного и кольцевого типа.

Первыми аппаратами появились эмульгаторы батарейного типа первого поколения, которые изготавливались из стеклопластика, из-за чего устройства выходили спустя 4-5 лет после начала эксплуатации. Но в батарейных эмульгаторах второго поколения (рисунок 17) был произведён переход на металлические конструкции [42].

На рисунке 16 представлена схема кольцевого эмульгатора и изображены его элементы [42].

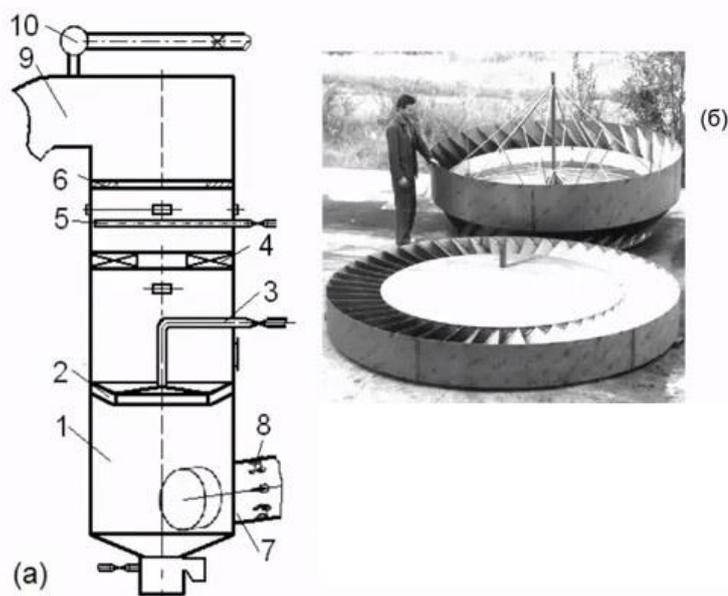


Рисунок 16 – а) Схема кольцевого эмульгатора; б) изображение титановых завихрителей, где:

1 – корпус, 2 – завихритель, 3 – труба орошения, 4 – раскручиватель, 5 – перфорированная труба для смыва золы с раскручивателя, 6 – козырёк, 7 – входной газоход, 8 – смывное устройство для очистки входного газохода, 9 – выходной газоход, 10 – подвод горячего воздуха.

Как правило, эмульгаторы изготавливаются на основе мокрых скрубберов, которые уже размещены на станции, что экономически выгодно. То есть «внутренности» каплеуловителя, труба Вентури мокрых скруббера убираются, и заменяются на завихритель 2 и раскручиватель 4 (рисунок 16 а).

Таким образом, закрученные в каплеуловителе 1 запылённые газы попадают на лопатки завихрителя 2, который усиливает закручивание потока. Через трубу орошения 3 вода распыляется завихрителем 2 и растекается плёнкой, образуя эмульсионный слой (за счёт интенсивного перемешивания) с поднимающимися частицами золы. Далее, эмульсионный поток, потеряв скорость в ходе перемешивания, поднимается к раскручивателю 4 и после центробежными силами разбрасывается по стенкам аппарата и смывается водой с перфорированной трубы 5. Отбойный козырёк 6 не позволяет эмульсионным «брызгам» попасть в выходной газоход 9, куда идёт очищенный газ. Уловленная зола поступает в систему ГЗУ.

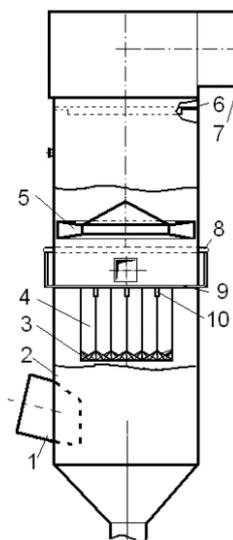


Рисунок 17 – Схема батарейного эмульгатора второго поколения, где:

1 – входной патрубок, 2 – корпус, 3 – завихритель, 4 – насадки завихрителя, 5 – лопастной каплеуловитель, 6 – отбойное кольцо, 7 – патрубок вывода газов, 8 – коллектор узла орошения, 9 – водораспределительные трубы, 10 – водораспределительные стаканы.

Различие в работе кольцевого и батарейного эмульгаторов заключается в разности скоростей газов в каплеуловителе, циркуляции эмульсионного слоя. В кольцевом эмульгаторе скорость примерно вдвое выше.

Небольшая скорость в батарейном эмульгаторе позволяет меньше подвергать износу материалы корпуса при высокой степени очистки золы.

Внутренние детали эмульгаторов выполняются из стали, титана (реже из-за высокой цены на материал). Снаружи – утепляются (а также подогреваются подводом горячего воздуха 10 рисунок 16а), чтобы сохранить температуру дымовых газов на выходе из аппарата (в процессе очистки температура может упасть со 140-160 °С до 60-70 °С) для предотвращения коррозии в дальнейшем газовом тракте.

Также для фракций золы размером 5-10 мкм унос золы у эмульгаторов составляет около 2%, что даёт преимущество перед электрофильтрами, где плохо улавливаются частицы такого размера.

В целом технология эмульгаторов является самой эффективной – из мокрых способов очистки. В Южноуральской ГРЭС с помощью кольцевых эмульгаторов была достигнута степень очистки дымовых газов в 99,9%. Такой показатель очистки достигается в основном с помощью электрофильтров и рукавных фильтров [42].

Преимущества эмульгаторов:

- высокая степень очистки (до 99,9 %);
- относительно небольшие габариты устройства;
- большой опыт эксплуатации (надёжность);
- малый унос частиц золы (2 %) маленького диаметра (5-10 мкм);
- возможность установки эмульгатора за счёт переоборудования скруббера (экономически целесообразно).

Недостатки эмульгаторов:

- высокая сложность технологии;
- высокий расход воды на орошение;
- необходимость подогревать дымовые газы после очистки;
- дорогие материалы для завихрителя и раскручивателя (из титана);
- возможное уменьшение степени очистки из-за низкой смачиваемости золы.

2.3 Мероприятия и технологии повышению эффективности очистки дымовых газов от золы

2.3.1 Электрофильтры

Одной из ключевых проблем при улавливании золы в электрофильтрах является неподходящий диапазон удельного электрического сопротивления золы ($\rho > 10^8$ Ом·м или $\rho < 10^2$ Ом·м).

Существуют две группы методов, позволяющие увеличить эффективность улавливание золы в электрофильтрах [38, 39, 43]:

- *методы кондиционирования газов* (химическое, температурно-влажностное, температурное);
- *методы снижения обратной короны* (импульсного питания, знакопеременного напряжения, предварительной ионизации).

В *химических методах кондиционирования* в дымовые газы добавляются различные примеси (аммиак, диоксид серы, пары воды, фосфор), что позволяет увеличить скорость дрейфа частиц золы к осаждающим электродам в 1,5-2,5 раза (рисунок 18) [39].

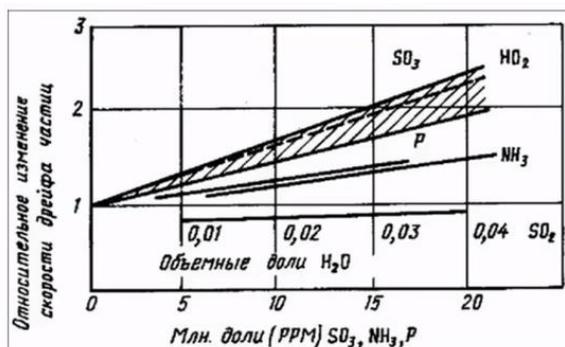


Рисунок 18 – Зависимость скорости дрейфа от количества различных примесей

Таким образом, на 30-40 % сокращаются капиталовложения в материалы для электрофильтра.

Метод температурного кондиционирования был описан ранее и его процессы изображены на рисунок 10.

Как было отмечено ранее, при низких температурах уходящих дымовых газов в золе достигается нужный диапазон удельного сопротивления ($10^2 < \rho < 10^8$ Ом·м). Однако, в этом случае во-первых увеличивается площадь поверхностей нагрева котла (повышается стоимость), которые в последствие будут больше подвергаться абразивному износу золой. Во-вторых, необходимо подогреть дымовые газы после электрофильтра для предотвращения коррозии в последующем газовом тракте.

При высоких температур уходящих дымовых газов получается «горячий» электрофильтр. Его следует разместить в «середине» газового тракта (после экономайзера и перед воздухоподогревателем), чтобы предотвратить большие выбросы теплоты в атмосферу. При переходе на высокие температуры газов (со 140 °С до 300 °С) увеличивается удельный объём газов, и, следовательно, при той же скорости движения газов как минимум в 1,5 раза увеличатся габариты электрофильтра, что повышает стоимость оборудования. Также необходимо будет учитывать температурные расширения электрофильтра. Положительный момент в таком способе – отсутствие абразивного износа золой поверхностей нагрева в газовом тракте после электрофильтра. С другой стороны, уловленная зола будет оставаться «горячей» и не будет отдавать теплоту конвективным поверхностям нагрева. Несмотря на повышение эффективности улавливания, такое мероприятие является дорогим и сложным в реализации [43].

Метод температурно-влажностного кондиционирования заключается в установке перед электрофильтром ступени мокрого золоуловителя (в частности скруббера). Иными словами осуществляется комбинация методов очистки (мокрый метод).

В мокром скруббере обеспечивается предварительная очистка и одновременное увлажнение газового потока, что снижает температуру дымовых газов и повышает поверхностную проводимость золы. После такого мероприятия остатки золы эффективно улавливаются в электрофильтре.

Данный принцип реализован на Экибастузской ГРЭС в двухступенчатом золоуловителе (рисунок 19). Общий КПД очистки дымовых газов составляет 98%, что является хорошим показателем, так как Экибастузский уголь, на котором работает станция, обладает высокой зольностью (до 50%) [43].

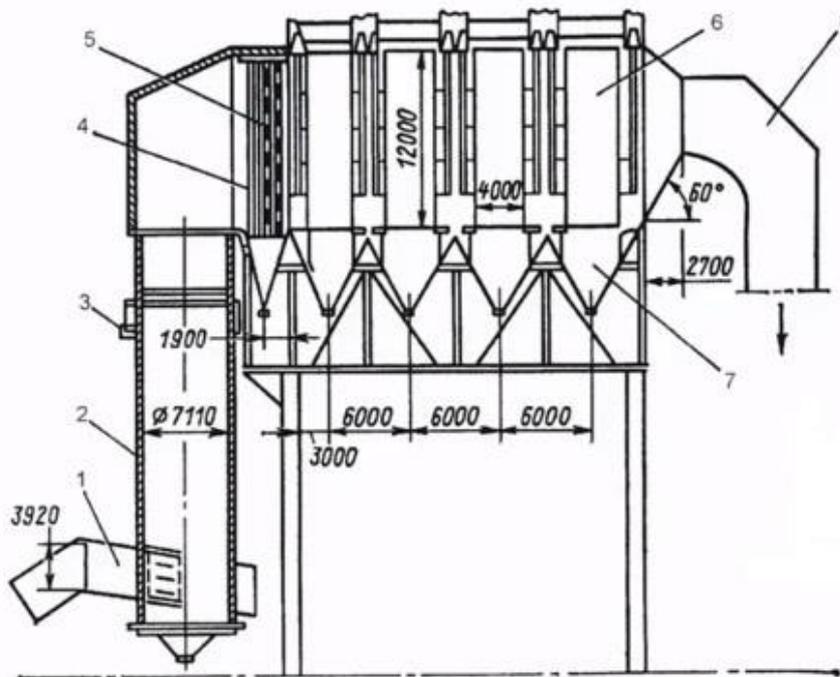


Рисунок 19 – Двухступенчатый золоуловитель, котёл П-57, блок 500 МВт, экибастузский уголь, где:

1 – вход запылённых газов (160 °С), 2 – скруббер, 3 – орошающая вода, 4 – каплеуловитель, 5 – газораспределительная решётка (110 °С), 6 – электрофильтр, 7 – бункер золы, 8 – очищенные газы.

Таким образом, исследованием было установлено, что при увеличении влагосодержания на 8-10 г/м³ и снижении температуры дымовых газов до 100 °С удельное электрическое сопротивление золы снижается в 7 раз.

Метод снижения импульсного питания заключается в переменной подаче напряжения (например, с интервалом 0,5 с), что увеличивает скорость дрейфа частиц (эффективность очистки повышается в 1,5-1,6 раз) и снижает энергопотребление электрофильтра (снижение мощности в 20 раз). Время переключения подбирается индивидуально, под конкретное поле

электрофильтра. Данная технология прошла опытную эксплуатацию, и её внедрение будет зависеть от интересов собственников станций [38].

Метод питания знакопеременным напряжением заключается в смене полярности на электродах при достижении напряжённости поля электрофильтра критического значения, что обеспечивает мгновенную перезарядку электрофильтра. Все заряженные частицы продолжают двигаться в ту же сторону, что и до смены знака заряда [43].

Метод предварительной ионизации заключается в организации специального пространства перед электрофильтром, где создаётся высокая напряжённость поля, и на высокой скорости (свыше 10 м/с) происходит ионизация газового потока, что позволяет производить быструю зарядку электродов [43].

На данный момент перечисленные методы находятся на стадии научной разработки. Наиболее подготовленной технологией является метод «импульсного питания».

2.3.2 Скрубберы

Несмотря на высокое качество очистки, эффективность применяемых скрубберов Вентури в ряде случаев не удовлетворяет действующим экологическим требованиям по уровню выбросов вредных частиц в атмосферу. Главным образом это зависит от физических эффектов, реализуемых в аппаратах мокрой очистки, и также от степени захватывания высокодисперсных частиц газовым потоком. Как показали исследования [44–45], улучшение процесса мокрой очистки с целью повышения эффективности коагуляции твердых частиц (фактически повышения вероятности столкновения их с каплями орошаемой жидкости) достигается при помощи оптимизации режимных или конструктивных параметров скрубберов Вентури.

К сожалению, такой подход к совершенствованию не позволяют увеличить эффективность улавливания частиц размером менее 1–2 мкм.

Одним из перспективных подходов, который не обуславливает внесение изменений в технологические режимы работы оборудования для газоочистки и может применяться для увеличения эффективности улавливания высокодисперсных частиц каплями жидкости, является ультразвуковая коагуляция в акустическом поле высокой интенсивности [46–47].

Ультразвуковая коагуляция является процессом сближения и объединения взвешенных твердых частиц в газовом потоке при помощи дополнительного соударения. Оно обусловлено тем фактом, что твердым частицам придается дополнительное колебательное встречное движение. В конечном итоге это приводит к их укрупнению и более эффективному осаждению.

Критерием оптимальности данной технологии является максимальная эффективность коагуляции золовых частиц в трубе Вентури и максимальная степень очистки дымовых газов.

По результатам испытания [48] «созданного ультразвукового оборудования на котлоагрегате БКЗ-220-100Ф ТЭЦ в золоулавливающей установке: в акустическом поле уменьшается концентрация частиц золы в отводящих газах до 4-х и более раз (эффективность не менее 98 %), процентное содержание частиц золы (размером менее 5 мкм) снижается до 15 раз».

2.3.3 Циклоны

В настоящее время в большинстве ТЭС используют электрофильтры, обладающие высокой степенью улавливания золы. В то же время эти устройства имеют ряд существенных недостатков: громоздкость (для установки требуются огромные площади), высокая металлоемкость. В связи с этим продолжают поиски новых более эффективных аппаратов. Одним из таких является электроциклон.

Электроциклон – «аппарат для удаления из газового потока твердых и жидких частиц, принцип работы которого заключается в осаждении частиц аэрозолей при совместном действии на них кулоновской и центробежной силы» [49].

Электроциклон имеет высокую эффективность улавливания (99,9%) при скоростях на входе до 15-17 м/с. Эффективность улавливания при повышенной скорости на входе (около 24 м/с) достигает значений 99,5% при установке профилированных элементов на осаждающий электрод.

Пылеунос при установке профилированных элементов на осаждающий электрод снижается в 4 раза [50].

На рисунке 20 представлена схема электроциклона.

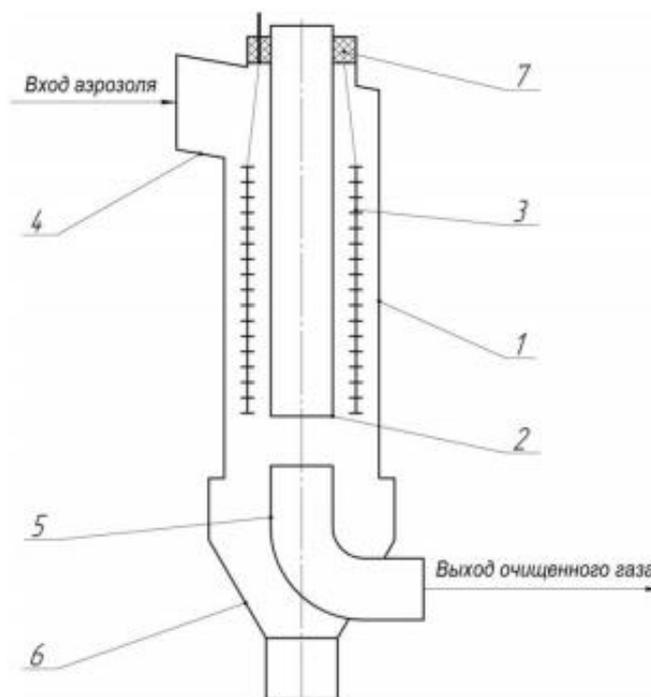


Рисунок 20 – Схема электроциклона, где:

1 – корпус, 2 – центральная труба, 3 – коронирующая система, 4 – входной патрубок, 5 – выхлопная труба, 6 – бункер, 7 – изолятор.

Одними из важнейших факторов, влияющих на процесс осаждения золы, являются скорость движения газового потока и длина активной зоны электроциклона (зона, где производится очистка). От них зависит турбулентность газа, и время пребывания аэрозоля в активной зоне аппарата,

следовательно, и величина электрического заряда, получаемого взвешенными частицами.

Вместе с тем, надо отметить недостатки электроциклонов. В них осаждаются только вещества находящиеся во «взвешанном» состоянии, т.е. в виде пыли или тумана, но – нельзя отделить один газ от другого (без предварительной конденсации вещества или без применения химической реакции). По причине физико-химических свойств и размеров частиц не все вещества эффективно улавливаются в электроциклоне: сажа, возгон окиси цинка, крупные фракции золы дымовых газов. Как минимум, перед очисткой необходимо измельчать приведённые выше вещества, что усложняет технологию.

Исследователи [51] установили, что «степень очистки возрастает с ростом высоты активной зоны, т.к. при этом увеличивается время пребывания газа в активной зоне; с увеличением скорости газа на входе в аппарат степень очистки снижается вследствие снижения времени пребывания и возрастания срыва осажённой золы с поверхности осаждающего электрода».

Преимущества электроциклонов:

- высокая степень очистки (частиц маленького диаметра);
- небольшие габариты;
- относительная простота технологии.

Недостатки электроциклонов:

- малый опыт эксплуатации (низкая надёжность);
- эффективное осаждение осуществляется только для веществ, находящихся во «взвешанном» состоянии (аэрозоль).

2.3.4 Фильтры очистки «горячих» газов

Вместе с развитием технологий сжигания топлива в циркулирующем кипящем слое появляются новые фильтры очистки высокотемпературных газов. Эти устройства выполняются из керамических пенных материалов с

добавлением элементов кремния и выдерживают агрессивную среду и температуры свыше 900 °С. Уникальное свойство этой технологии – способность самоочищаться в процессе эксплуатации по причине сгорания загрязнённых частиц на поверхности фильтра [38].

На данный момент существует две модификации описанных золоуловителей [38]:

- первая – система "обращенных" свечей, где фильтрация осуществляется на внутренней поверхности тонкостенных трубчатых керамических элементов, заключенных в металлический кожух;
- вторая – построена из плоских керамических пластин. Фильтры устанавливаются либо на выходе горячих газов из котла с циркулирующим кипящим слоем (в газоходе под давлением), либо после циклона с байпасом к циклонной системе.

«Керамические фильтры» в основном разрабатываются немецкими и японскими компаниями, и пока находятся на стадии испытаний.

2.4 Оценка конкурентоспособности технологий

Произведём оценку конкурентоспособности описанных технологий. Для этого выявлено 11 критериев, охватывающих полный спектр возможностей и особенностей золоуловителей.

Конкурентоспособность определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i,$$

где:

- V_i – вес критерия (в долях единицы), выставяемый по его приоритету;
- B_i – шкала оценки (от 0 до 10), выставяемая в зависимости от выявленных преимуществ и недостатков золоуловителей, эксплуатируемых в отечественной энергетике: B_1 – циклоны; B_2 – скрубберы; B_3 – эмульгаторы; B_4 – электрофильтры; B_5 – рукавные фильтры.

Таблица 4 – Карта для сравнения технологий

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы					Конкур. способность				
		Б ₁	Б ₂	Б ₃	Б ₄	Б ₅	К ₁	К ₂	К ₃	К ₄	К ₅
Эффективность очистки	0,2	5	7	9	9	9	1	1,4	1,8	1,8	1,8
Простота технологии	0,06	10	7	5	7	8	0,6	0,42	0,3	0,42	0,48
Габариты устройства	0,08	8	8	8	3	5	0,64	0,64	0,64	0,24	0,4
Надёжность (опыт эксплуатации)	0,05	9	7	6	9	5	0,45	0,35	0,3	0,45	0,25
Минимизация расхода воды	0,08	10	2	0	10	10	0,8	0,16	0	0,8	0,8
Улавливание частиц всех фракций	0,15	4	8	9	6	8	0,6	1,2	1,35	0,9	1,2
Потенциал к модернизации/переоборудованию	0,06	10	8	7	7	4	0,6	0,48	0,42	0,42	0,24
Независимость эффективности очистки от свойств золы	0,1	4	6	7	4	5	0,4	0,6	0,7	0,4	0,5
Минимизация затрат (конструкция, реализация технологии)	0,1	8	6	4	6	3	0,8	0,6	0,4	0,6	0,3
Область применения	0,02	9	9	8	6	8	0,18	0,18	0,16	0,12	0,16
Совершенство технологии (отсутствие «обратных» эффектов, негативных последствий, сочетание с другими золоуловителями)	0,1	6	7	7	6	7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7
Итого	1	83	75	70	73	72	6,67	6,73	6,77	6,75	6,83

Переведём полученные баллы в процентах (по формуле $(K_i/\sum K) \cdot 100\%$) для наглядности и представим в виде линейной диаграммы (рисунок 21).

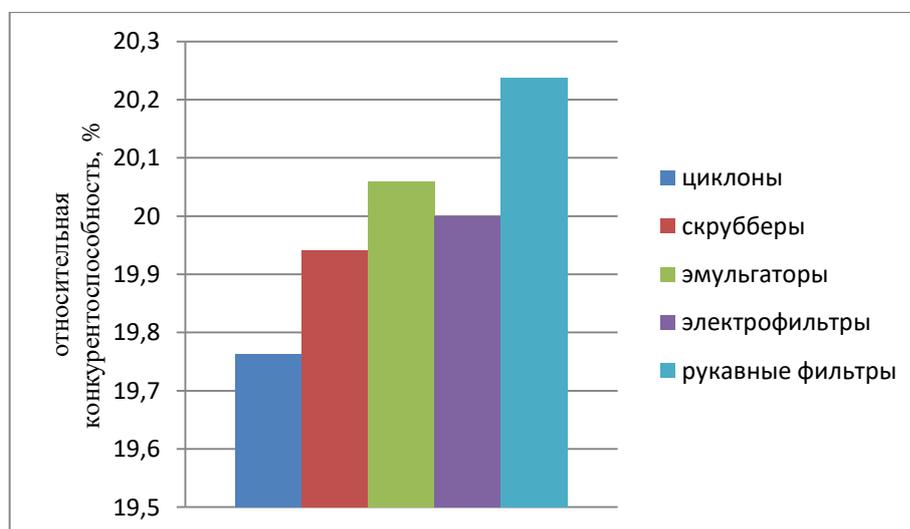


Рисунок 21 – Относительная конкурентоспособность технологий

Диаграмма на рисунке 21 демонстрирует, что наибольший охват имеют рукавные фильтры (20,2 %) и эмульгаторы (20 %). Градация между конкурентоспособностью технологий составляет около 0,5 %, что говорит об эквивалентности их потенциала. Однако при проектировании новых ТЭС

целесообразней выбрать «ведущие» аппараты по очистки дымовых газов.

В общем случае выбор системы золоулавливания осуществляется по таким ключевым факторам, как: месторождение используемого топлива и, следовательно, свойства получаемой золы; температура уходящих дымовых газов; площадь свободного пространства под установку аппарата и др.

Таким образом, у работающих станций стоит задача удовлетворять экологические требования по очистке загрязнённых газов, исходя из своих возможностей. Следует учитывать затраты на мероприятия по улучшению систем очистки, т.к. в настоящее время слабо происходит внедрение новых технологий.

Эффективными и относительно мало затратными решениями по улучшению эффективности системы золоулавливания в установившейся экологической парадигме являются:

- комбинирование разных типов золоуловителей в 2х и более ступенчатые системы;
- применение мероприятий по модернизации конфигурации аппарата;
- переоборудование золоуловителя в другой тип (например, из скруббера в коагулятор);
- изменение свойств золы перед улавливанием (например, добавление примесей аммиака в дымовые газы перед электрофильтром).

В качестве примера разберём система золоулавливания Томской ГРЭС-2.

2.5 Расчёты золоулавливающих установок

В данном пункте произведен расчёт золоуловителей, установленных на Томской ГРЭС-2, и предлагаемых золоуловителей для повышения эффективности очистки. Цель расчётов: демонстрация эффективных технологий по золоулавливанию, которые в будущем могут использоваться для модернизации соответствующего оборудования Томской ГРЭС-2 [52-53].

2.5.1 Исходные данные

В таблицах 5-16 приведены сведения для расчётов, предоставленные Томской ГРЭС-2, каталог оборудования и нормативы ПДВ.

Таблица 5 – Характеристики топлива [53]

Месторождение	Марка	SiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	A _{пр} , %·кг/МДж
Кузнецкий	Д	60	20,6	3,04

Таблица 6 – Характеристики угля [53]

Месторождение	Марка	W _p	A _p	S _p	C _p	H _p	N _p	O _p	Q _n ^p
		%	%	%	%	%	%	%	МДж/кг
Кузнецкое	Д	11,5	15,9	0,4	56,4	4	1,9	9,9	21,9

Таблица 7 – Дисперсный состав золы, Φ_i % [52]

Размеры частиц, d _i , мкм						
2,0	5,0	10,0	15,0	20,0	30,0	>40
10	24	18	10	8	2	28

Таблица 8 – Параметры Томской ГРЭС-2

Электрическая мощность Nэ	Удельный расход тепла q _э	Количество турбин	Количество котельных агрегатов
МВт	кДж/кВт·ч	-	-
331	5088	6	10

Таблица 9 – Параметры котлоагрегатов Томской ГРЭС-2

Котельный агрегат	КПД котла Пк, %	Температура уходящих газов, °С	Теплопроизводительность котлов Q, МВт
КА-3	90,71	185	255,9
КА-4 (сжигается только газ)	91,96	175,4	267,5
КА-5	89,82	192	267,5
КА-6	89,84	193	267,5
КА-7	89,84	193	267,5
КА-8	89,84	193	267,5
КА-9	90,76	186	255,9
КА-10	91,56	157	244,2
КА-11	91,56	157	244,2
КА-12	91,56	157	244,2

Таблица 10 – Данные по золоуловителям Томской ГРЭС-2

Ст. № котла	Тип, марка ГОУ	Колич. на котел	Год ввода эксплуатацию	Средняя эксплуатационная эффективность пылеулавливания, %
3	МВ ВТИ	4	1981	96÷97,5
4	БЦР-250/4х120	4	1953	Работает только на газе
5	Эмульгатор	4	2010	98,4÷ 99,1
6	МВ ВТИ	4	1958	96÷97,5
7	МВ ВТИ	4	1959	96÷97,5
8	МВ ВТИ	4	1960	96÷97,5
9	МВ ВТИ	4	1971	96÷97,5
10	Эмульгатор	4	2017	99,0÷99,5
11	МВ ВТИ	4	1988	96÷97,5
12	Батарейный эмульгатор II-го поколения	4	2019	99,0÷99,5

Таблица 11 – Технические характеристики электрофильтров

Типы электрофильтров	Площадь активного сечения, f, м ²	Поверхность осаждения, А, м ²	Активная длина поля, L, м
ЭГА 1-40-12-6-4	109,8	13992	3,84
ЭГА 1-40-7,5-4-3	81,9	4731	2,56
ЭГА 1-20-9-6-4	49,0	5652	3,84
ЭГА 1-30-7,5-4-4	61,4	4732	2,56
ЭГА 1-30-9-6-4	73,4	8480	3,84
ЭГА 2-56-12-6-4	97,4	11244	3,84
ЭГА 1-40-7,5-4-4	181,7	20984	3,84
ЭГА 2-76-12-6-4	246,6	28480	3,84
ЭГА 1-40-12-6-4	129,8	14992	3,84
ЭГА 2-48-12-6-4	156,8	17992	3,84
ЭГА 2-88-12-6-4	285,6	32976	3,84
ЭГВ2-26-12-6-4	135,1	8480	3,84

Таблица 12 – Параметры батарейных эмульгаторов II-го поколения

№ пп	Наименование регламентируемых параметров	Ед. изм.	Проектные показатели
1	Температура очищаемого газа:	°С	
	на входе:		145
	на выходе (до присадки горячего воздуха)		55-60
	на выходе (после присадки горячего воздуха)		≥75
2	Концентрация вредных веществ в очищаемом газе:	г/нм ³	
	на входе:		21-30
	на выходе:		≤0,25
3	Расход воды на орошение	м ³ /ч	49-54
4	Эффективность установки	%	99-99,55

Таблица 13 – Параметры МВ ВТИ

№ пп	Наименование регламентируемых параметров	Ед. изм.	Проектные показатели
1	Температура очищаемого газа:	°С	
	на входе:		130-138
	на выходе		85
2	Концентрация вредных веществ в очищаемом газе:	г/м ³	
	на входе:		25-40
	на выходе:		0,5-1,5
3	Расход воды на орошение	м ³ /ч	42,4
4	Эффективность установки	%	96,0-97,5
5	Скорость дымовых газов в горловине	м/с	60
6	Удельный расход воды на орошение ЗУУ	кг/м ³	0,22
7	Площадь активного сечения	м ²	0,5

Таблица 14 – Технические характеристики МЗУ [52]

Показатель	МС-2800	МС-3000	МС-3200	МС-3600	МС-4000	МС-4500
Расход газов через аппарат	80-95	96-115	116-139	140-175	176-220	221-275
(Номинальный при скорости газов в горловине ТКВ 54 м/с), тыс. м ³ /ч	(90)	(108)	(128)	(160)	(200)	(250)
Расход воды на орошение ЦС, т/ч	4,4	4,7	5	5,7	6,3	7
Расход металла на аппарат, т.	7	8	9,1	11,5	14,2	18
Вес аппарата, т: рабочий	15,3	17,25	20,1	24,6	29,9	37,8
Удельная металлоемкость, т/тыс. м ³ /ч	0,078	0,074	0,073	0,072	0,071	0,072
Основные размеры, мм:						
а ₁	842	930	1005	1020	1135	1295
В ₁	1620	1790	1935	2365	2640	3000
а ₂	390	430	465	490	500	570
В ₂	1170	1290	1395	1800	2000	2200
L	3750	4070	4310	4540	4930	5490
B	1550	1680	1750	2040	2260	2490
K	930	980	1040	1230	1380	1550
Площадь активного сечения КУ, м ²	5,72	6,60	7,54	9,62	11,93	15,2
Площадь горловины трубы Вентури, м ²	0,455	0,53	0,644	0,81	1,000	1,300

Таблица 15 – Допустимые по условиям охлаждения газов удельные расходы воды на орошение золоуловителей. кг/м³ [52]

Типоразмер		Допустимая температура за золоуловителем, °С							
		70 - 75				75 - 80			
		Температура уходящих газов, °С							
		130	150	170	190	130	150	170	190
МС	2800	-	0,085	0,11	0,135	-	-	0,09	0,115
	3000	-	0,085	0,11	0,125	-	-	0,095	0,11
	3200	-	0,085	0,11	0,125	-	-	0,095	0,11
	3600	-	0,085	0,105	0,125	-	-	0,09	0,11
	4000	-	0,080	0,105	0,125	-	-	0,09	0,105
	4500	-	0,080	0,1	0,120	-	-	0,085	0,105
МВ	3100	0,12	0,18	0,225	-	0,1	0,15	0,185	0,225
	3300	0,12	0,175	0,22	-	-	0,145	0,18	0,22
	3500	0,12	0,175	0,22	-	-	0,14	0,175	0,22
	3700	0,11	0,16	0,22	-	-	0,135	0,17	0,20
	3900	0,11	0,15	0,19	-	-	0,12	0,16	0,19
	4400	0,10	0,15	0,185	-	-	0,125	0,16	0,19

Томская ГРЭС-2 введена в эксплуатацию в 1945 году, является станцией с поперечными связями (несколько котлов связано с одной турбиной) и работает на каменном угле Кузнецкого месторождения. Теплопроизводительность котлов не превышает 300 МВт. Один из котлов (КА-4) работает на газе (нет выбросов золы), поэтому он не будет учитываться в расчётах. В таблице 16 представлены нормативы ПДВ для рассматриваемой станции [54].

Таблица 16 – Нормативы ПДВ в атмосферу твёрдых частиц для котельных установок, вводимых на ТЭС до 31 декабря 2000 г., для твёрдого топлива всех видов

Теплопроизводительность котла Q, МВт	Приведённое содержание золы A _{пр} , %·кг/МДж	Массовая концентрация частиц в дымовых газах при a=1,4 мг/м ³ н.у.
До 299	Менее 0,6	150
	0,6-2,5	150-500
	<u>Более 2,5</u>	<u>500</u>

На трёх котлах работают батарейные эмульгаторы II-го поколения, которые были установлены в течение прошедших 10 лет. Однако на остальных 6-ти установках подключены скрубберы ВТИ, которые введены в эксплуатации больше 30 лет назад. Проверим работу перечисленных аппаратов на значение ПДВ.

2.5.2 Определение расхода топлива и дымовых газов

Пример приводится для КА-3.

Находим расход топлива:

$$B = \frac{Q}{Q_H^P \cdot \eta_k} = \frac{255,9}{21,9 \cdot 0,907} = 12,9 \text{ кг/с,}$$

Находим массу золы на выходе из котла:

$$M_z = 10B \cdot \left(A^P + \frac{Q_H^P}{32,7} \cdot q_4 \right) \cdot \alpha_{\text{yh}}, \text{ г/с,}$$

$$M_z = 10 \cdot 12,9 \cdot \left(15,9 + \frac{21,9}{32,7} \cdot 1,4 \right) \cdot 0,95 = 2060,6 \text{ г/с,}$$

где:

- принимаем $\alpha_{\text{yh}}=0,95$ и $q_4=1,4\%$ – подставляем в процентах;
- 32,68 МДж/кг – теплота сгорания углерода;
- Q_H^P – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг;
- A^P – зольность топлива на рабочую массу, %, подставляем в процентах;
- B – расход натурального топлива, кг/с.

Рассчитываем объем дымовых газов перед золоуловителем:

$$V_{\text{дг}} = V_0^{\Gamma} \cdot B \cdot \frac{t_{\text{дг}} + 273}{273} = 8,65 \cdot 12,9 \cdot \frac{185 + 273}{273} = 186,9 \text{ м}^3/\text{с,}$$

где:

- теоретическое количество сухого воздуха, необходимого для полного сгорания топлива рассчитывается по формуле. Значения подставляем в процентах:

$$V_0 = 0,089(C^P + 0,375S^P) + 0,265H^P - 0,033O^P, \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}};$$

$$V_0 = 0,089 \cdot (56,4 + 0,375 \cdot 0,4) + 0,265 \cdot 4 - 0,033 \cdot 9,9 = 5,766 \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}};$$

- теоретический объем азота:

$$V_{N_2O} = 0,79V_0 + 0,008N^P = 0,79 \cdot 5,766 + 0,008 \cdot 1,9 = 4,571 \frac{\text{НМ}^3}{\text{КГ}};$$

- теоретический объем трехатомных газов:

$$V_{RO_2} = 1,866 \cdot (C^P + 0,375S^P) \cdot 10^{-2} = 1,866 \cdot (56,4 + 0,375 \cdot 0,4) \cdot 10^{-2} = 1,055 \frac{\text{НМ}^3}{\text{КГ}};$$

- объем водяных паров:

$$V_{H_2O} = 0,111H^P + 0,0124W^P + 0,0161V_0 + 0,016(\alpha - 1)V_0, \frac{\text{НМ}^3}{\text{КГ}},$$

$$V_{H_2O} = 0,111 \cdot 4 + 0,0124 \cdot 11,5 + 0,0161 \cdot 5,766 + 0,016 \cdot (1,4 - 1) \cdot 5,766 = 0,716 \frac{\text{НМ}^3}{\text{КГ}},$$

где $\alpha = 1,4 \frac{\text{НМ}^3}{\text{КГ}}$;

- удельный объем дымовых газов:

$$V_0^\Gamma = V_0(\alpha - 1) + V_{N_2O} + V_{RO_2} + V_{H_2O}, \frac{\text{НМ}^3}{\text{КГ}},$$

$$V_0^\Gamma = 5,766 \cdot (1,4 - 1) + 4,571 + 1,055 + 0,716 = 8,649 \frac{\text{НМ}^3}{\text{КГ}}.$$

2.5.3 Анализ эффективности золоуловителей, установленных на Томской ГРЭС-2

На каждый котлоагрегат Томской ГРЭС-2 установлено по 4 золоуловителя. В проектировочных данных указано, что площадь горловины скруббера $f_{\text{ср}} = 0,5 \text{ м}^2$, а удельный расход воды на орошение ЗУУ $q = 0,22 \text{ кг/м}^3$.

Для расчётов эмульгаторов будет использоваться их проектировочная степень очистки.

Уточняем фактическую скорость дымовых газов в горловине скруббера:

$$u_{\text{дг}}^\phi = \frac{\vartheta_{\text{дг}}}{z \cdot f_{\text{ср}}} = \frac{186,9}{4 \cdot 0,5} = 93,5 \text{ м/с}.$$

Фактическая скорость вышла выше указанных 60 м/с.

Определим параметр золоуловителя:

$$\Pi = \sqrt{q \cdot u_{дг}^{\phi}} = \sqrt{0,22 \cdot 93,5} = 4,534.$$

Определение показателей эффективности золоулавливания:

$$\varepsilon = e^{-\Pi} = e^{-4,534} = 0,01074;$$

$$\eta = 1 - \varepsilon = 1 - 0,01074 = 0,98926.$$

Массовый выброс золы в атмосферу:

$$M_{уН} = M_{Г}(1 - \eta_{зу}^{мокр}) = 2060,6 \cdot (1 - 0,98926) = 22,1 \text{ г/с}.$$

Концентрация золы на выходе из ЗУ:

$$C_{вых} = \frac{M_{уН} \cdot 10^3}{V_{дг}} = \frac{22,1 \cdot 10^3}{186,9} = 118,4 \text{ мг/м}^3.$$

Полученное значение превышает ПДВ (для экологически чистой станции):

$$C_{вых} = 118,4 \text{ мг/м}^3 \leq 500 \text{ мг/м}^3.$$

Сведём результаты расчётов в таблицу 17.

Таблица 17 – Результаты расчётов выбросов золы для различных КА

Котельный агрегат	Тип золоуловителя	Год ввода в эксплуатацию	Объём дымовых газов, м ³ /с	Фактическая степень очистки аппарата, %	Выбросы золы на выходе ЗУ, мг/м ³
КА-3	МВ ВТИ	1981	186,9	98,93	118,4
КА-5	Эмульгатор	2010	200,3	99,28	78,7
КА-6	МВ ВТИ	1958	200,7	99,09	98,7
КА-7	МВ ВТИ	1959	200,7	99,09	98,7
КА-8	МВ ВТИ	1960	200,7	99,09	98,7
КА-9	МВ ВТИ	1971	187,2	98,93	117,7
КА-10	Эмульгатор	2017	165,9	99,28	85,1
КА-11	МВ ВТИ	1988	165,9	98,6	163,9
КА-12	Батарейный эмульгатор II-го поколения	2019	165,9	99,28	85,1

Результаты в таблице 17 демонстрируют, что все устройства по отдельности удовлетворяют НУВ. В сумме выбросы составляют 945 мг/м³, что в 1,9 раз превышает ПДВ. Так используемый уголь обладает высокой

приведённой зольностью 3,04 %·кг/МДж, то такие значения выбросов имеют закономерный характер. При более низкой зольности топлива количество выбросов было бы на порядок ниже. Но мировые тенденции показывают, что требования к выбросам только ужесточаются.

Поэтому в рамках данной работы необходимо провести мероприятия по улучшению эффективности системы золоулавливания.

В данном случае мало затратными вариантами являются:

- установить дополнительную секцию скрубберов к эмульгаторам/скрубберам;
- переоборудовать старые скрубберы в эмульгаторы (желательно, кольцевого типа, т.к. в них интенсивней происходит циркуляция эмульсионного слоя, что повышает эффективность улавливания);
- установка батарейных циклонов (для улавливания крупных фракций золы) перед скрубберами/эмульгаторами.

Много затратными мероприятиями являются:

- установка в качестве дополнительной секции электрофильтры после скрубберов/эмульгаторов (по проектным данным температура уходящих газов после имеющихся аппаратов ниже/около 100 °С, что позволит эффективней улавливать золу в электрофильтрах, т.к. зола будет иметь благоприятный диапазон удельного электрического сопротивления);
- установка сушильной установки с горячим воздухом и рукавных фильтров после скрубберов/эмульгаторов (такая модификация позволит уловить частицы золы мельчайших фракций и избежать коррозионных процессов в газовом тракте от конденсации дымовых газов).

Определим среднюю температуру уходящих дымовых газов по всем котельным установкам для подбора «универсальной» модели мокрого золоуловителя:

$$\vartheta_{дг} = \sum (\vartheta_{дгi})/9 = 186 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2.5.4 Расчёт нового МЗУ и анализ выбросов золы

Определяем расчётную площадь проходного сечения МЗУ:

$$f_p = \frac{\vartheta_{\text{дг}}}{z \cdot u_{\text{дг}}} = \frac{186}{2 \cdot 70} = 1,33 \text{ м}^2,$$

где:

- z – количество золоуловителей (выберем $z=2$);
- $\vartheta_{\text{дг}}$ – средний объём дымовых газов;
- $u_{\text{дг}}$ – скорость дымовых газов (выберем из рекомендуемых значений 50-75 м/с).

Выбираем типоразмер (МЗУ) и справочную площадь активного сечения ($f_{\text{спр}}$, м²) тип МЗУ – МС-4500:

$$f_{\text{спр}} = 1,3 \text{ м}^2;$$

Уточняем фактическую скорость дымовых газов в горловине Вентури:

$$u_{\text{дг}}^{\phi} = \frac{\vartheta_{\text{дг}}}{z \cdot f_{\text{спр}}} = \frac{186}{2 \cdot 1,3} = 71,9 \text{ м/с}.$$

Скорость соответствует интервалу оптимальной скорости, следовательно, остановимся на выбранном МЗУ.

Определение удельного расхода воды по таблице 15:

Используя маркировку МЗУ, температуру уходящих газов ($t_{\text{дг}}$), а так же, учитывая, что допустимая температура за МЗУ составляет 70-75 °С, по табл. 15 (определяем методом интерполяции):

$$q = 0,115 \text{ кг/м}^3.$$

Определим параметр золоуловителя:

$$\Pi = \sqrt{q \cdot u_{\text{дг}}^{\phi}} = \sqrt{0,115 \cdot 71,9} = 2,875.$$

Определение показателей эффективности золоулавливания второй секции:

$$\varepsilon = e^{-\Pi} = e^{-2,875} = 0,0564;$$

$$\eta_{\text{II}} = 1 - \varepsilon = 1 - 0,0564 = 0,9436.$$

Далее приведён пример для КА-3.

Эффективность 2-х этапов ЗУ определяется по следующему уравнению:

$$\eta_{ЗУ}^{2X} = \eta_{ЗУ}^I + \eta_{ЗУ}^{II}(1 - \eta_{ЗУ}^I);$$

$$\eta_{ЗУ}^{2X} = 0,98926 + 0,9436 \cdot (1 - 0,98926) = 0,9994.$$

Массовый выброс золы в атмосферу:

$$M_{уН} = M_{Г}(1 - \eta_{ЗУ}^{2X}) = 2060,6 \cdot (1 - 0,9994) = 1,2 \text{ г/с.}$$

Концентрация золы на выходе из ЗУ:

$$C_{\text{вых}} = \frac{M_{уН} \cdot 10^3}{V_{\text{дг}}} = \frac{1,2 \cdot 10^3}{186,9} = 6,7 \text{ мг/м}^3.$$

Полученное значение не превышает ПДД (удовлетворяет НУВ):

$$C_{\text{вых}} = 6,7 \text{ мг/м}^3 < 500 \text{ мг/м}^3.$$

Приведём остальные результаты расчёта в таблицу 18.

Таблица 18 – Результаты расчётов выбросов золы для различных КА после улучшающих мероприятий (скруббер)

Котельный агрегат	Золоуловители	Объём дымовых газов, м ³ /с	Общая степень очистки, %	Выбросы золы на выходе ЗУ, мг/м ³
КА-3	МВ ВТИ + МС 4500	186,9	99,94	6,7
КА-5	Эмульгатор + МС 4500	200,3	99,96	4,4
КА-6	МВ ВТИ + МС 4500	200,7	99,95	5,6
КА-7	МВ ВТИ + МС 4500	200,7	99,95	5,6
КА-8	МВ ВТИ + МС 4500	200,7	99,95	5,6
КА-9	МВ ВТИ + МС 4500	187,2	99,94	6,6
КА-10	Эмульгатор + МС 4500	165,9	99,96	4,8
КА-11	МВ ВТИ + МС 4500	165,9	99,92	9,2
КА-12	Батарейный эмульгатор II-го поколения + МС 4500	165,9	99,96	4,8

После улучшающих мероприятий (таблица 18) суммарные выбросы составляют 53,3 мг/м³. При достаточной высоте дымовой трубы рассеивание такого количества золы не будет заметно для человеческого организма, что очень приближает показатели работы ТЭС экологически чистым значениям.

Таким образом, выбросы удалось снизить почти в 18 раз, следовательно, подобные связи золоуловителей можно считать эффективными.

Рассмотрим альтернативный вариант золоулавливающего оборудования – электрофильтр.

2.5.5 Расчёт предлагаемого электрофильтра (ЭФ) и анализ выбросов золы

В качестве дополнительного решения рассмотрим электрофильтр, который часто применяется на ТЭС. Так же подбираем «универсальную» модель.

Определение E и $K_{ок}$ (табл. 19):

Таблица 19 – Значение характеристик в зависимости от K_{ϕ}

Значение	Скорость газа $u_{дг}$, м/с	Напряженность поля, E , кВТ	Коэффициент $K_{ок}$
$K_{\phi} < 100$	1,6-1,8	260-280	0,6-0,8
$K_{\phi} > 100$	1,0-1,2	240	1,0

Рассчитываем K_{ϕ} :

$$K_{\phi} = \frac{(Al_2O_3 + Si_2O_3) \cdot A^r}{(W^r + 9 \cdot H^r) \cdot S^r} = \frac{(20,6 + 60) \cdot 15,9}{(11,5 + 9 \cdot 4) \cdot 0,4} = 67,4.$$

Тогда по данным таблицы 6 определяем:

$$u_{дг} = 1,7 \text{ м/с},$$

$$E = 270 \text{ кВТ},$$

$$K_{ок} = 0,7.$$

Определяем расчетную площадь проходного сечения:

$$f_p = \frac{v_{дг}}{z \cdot u_{дг}} = \frac{186}{1 \cdot 1,7} = 109,4 \text{ м}^2,$$

где:

- z – количество золоуловителей (выберем $z = 1$),
- $v_{дг}$ – средний объем дымовых газов,
- $u_{дг}$, м/с – скорость дымовых газов.

Выбираем типоразмер (ЭГА – электрофильтр горизонтальный с межэлектродным шагом 300 мм) и справочную площадь активного сечения ($f_{\text{спр}}, \text{м}^2$) по таблице 11:

$$f_{\text{спр}} = 109,8 \text{ м}^2;$$

тип электрофильтра: ЭГА 1-40-12-6-4;

активная длина поля, $L=3,84 \text{ м}$.

Уточняем фактическую скорость дымовых газов:

$$u_{\text{др}}^{\phi} = \frac{v_{\text{др}}}{z \cdot f_{\text{спр}}} = \frac{186}{1 \cdot 109,8} = 1,69 \text{ м/с}.$$

Если скорость выходит за пределы рекомендуемых значений, то нужно сменить ЭФ.

Определение параметра Π , проскока и эффективности работы электрофильтра (пример для $d_i=2 \text{ мкм}$). Результаты сведены в таблицу 20.

Действие электрофильтра основано на осаждении заряженных в высоконапряженном электрическом поле частиц золы на поверхностях осадительных электродов. Эффективность золоулавливания электрофильтров зависит от некоторого параметра Π_i , который находится из эмпирического соотношения для каждой фракции золовых частиц:

$$\begin{aligned} \Pi_i &= 0,2k_{\text{ун}} \sqrt{\frac{v_i}{u_{\text{др}}^{\phi}}} \cdot \frac{nL}{t} = \\ &= 0,2 \cdot 0,878 \cdot \sqrt{\frac{0,018}{1,69}} \cdot \frac{4 \cdot 3,84}{0,15} = 1,846, \end{aligned}$$

где:

- $k_{\text{ун}}$ – коэффициент вторичного уноса;
- n – число полей по ходу газа (пункт 6 ЭГА – пятое число);
- L – длина одного поля;
- $t=0,15 \text{ м}$ – расстояние между коронирующим и осаждающими электродами;
- v_i – скорость дрейфа (осаждения) частиц, м/с;

- $u_{дг}^{\phi}$ – действительная скорость газа, м/с.

Коэффициент вторичного уноса определяется по выражению:

$$k_{уи} = K_n K_{эл} K_{вс} [1 - 0,25(u_{дг}^{\phi} - 1)],$$

$$k_{уи} = \frac{7,5}{12} \cdot 1 \cdot 1,7 \cdot [1 - 0,25 \cdot (1,69 - 1)] = 0,878,$$

где:

- $K_n = 7,5/H$ – коэффициент высоты электрода, он учитывает, что при большой высоте электрода $H=12$, м (пункт 6 ЭГА – третье число), часть золы не успевает осесть в бункере;
- $K_{эл}=1$ – учитывает тип электродов и для стандартных типов;
- $K_{вс}=1,7$ учитывает режим встряхивания электродов на вторичный унос и принимается.

Технические характеристики электрофильтров n , L , t , f_c принимаются по заданному типоразмеру электрофильтра из таблицы 4.

Скорость дрейфа частиц следует считать для каждой фракции отдельно по уравнению:

$$v_i = 0,25(k_{ок} \cdot E)^2 \cdot d_i \cdot 10^{-6} = 0,25 \cdot (0,7 \cdot 270)^2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 0,018,$$

где:

- $k_{ок}$ – коэффициент, учитывающий образование в электрофильтре обратной короны при улавливании высокоомных зол;
- E – средняя напряженность электрического поля, кВ. Эти величины зависят от электрофизических свойств золы и приводятся в таблице исходных данных;
- d_i – диаметр фракций принимается из исходных данных, м.

В зависимости от Π_i (Приложение А) определяется фракционная степень проскока золовых частиц ε_i .

Таблица 20 – Результаты расчёта

d_i , мкм	2	5	10	15	20	30	40
V_i	0,018	0,045	0,089	0,134	0,179	0,268	0,357
Π_i	1,846	2,919	4,129	5,056	5,839	7,151	8,257
ε_i	0,1653	0,055	0,0166	0,0061	0,003	0,0007	0,0003

По данным таблиц 7 и 20 получаем $\sum \varepsilon_i \Phi_i = 6,4928$.

Общая степень проскока определится:

$$\varepsilon = \sum \varepsilon_i \Phi_i / 100 = 6,4928 / 100 = 0,065.$$

Эффективность золоуловителя для равномерного скоростного потока газа:

$$\eta = 1 - \varepsilon = 1 - 0,065 = 0,935.$$

Далее приведён пример для КА-3.

Эффективность 2-х секций ЗУ:

$$\eta_{ЗУ}^{2x} = 0,98926 + 0,935 \cdot (1 - 0,98926) = 0,9993.$$

Количество выброшенной в атмосферу золы $M_{уН}$, г/с:

$$M_{уН} = M_3 \cdot (1 - \eta) = 2060,6 \cdot (1 - 0,9993) = 1,4 \text{ г/с}.$$

Концентрация золы на выходе из ЗУ:

$$C_{\text{вых}} = \frac{M_{уН} \cdot 10^3}{V_{\text{дг}}} = \frac{1,4 \cdot 10^3}{186,9} = 7,7 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}.$$

Полученное значение не превышает ПДВ (удовлетворяет НУВ):

$$C_{\text{вых}} = 7,7 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3} < 500 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}.$$

Приведём остальные результаты расчёта в таблицу 21.

Таблица 21 – Результаты расчётов выбросов золы для различных КА после улучшающих мероприятий (электрофильтр)

Котельный агрегат	Золоуловители	Объём дымовых газов, м ³ /с	Общая степень очистки, %	Выбросы золы на выходе ЗУ, мг/м ³
КА-3	МВ ВТИ + ЭФ ЭГА 1-40-12-6-4	186,9	99,93	7,7
КА-5	Эмульгатор + ЭФ ЭГА 1-40-12-6-4	200,3	99,95	5,1
КА-6	МВ ВТИ + ЭФ ЭГА 1-40-12-6-4	200,7	99,94	6,4
КА-7	МВ ВТИ + ЭФ ЭГА 1-40-12-6-4	200,7	99,94	6,4
КА-8	МВ ВТИ + ЭФ ЭГА 1-40-12-6-4	200,7	99,94	6,4
КА-9	МВ ВТИ + ЭФ ЭГА 1-40-12-6-4	187,2	99,93	7,6
КА-10	Эмульгатор + ЭФ ЭГА 1-40-12-6-4	165,9	99,95	5,5
КА-11	МВ ВТИ + ЭФ ЭГА 1-40-12-6-4	165,9	99,91	10,6
КА-12	Батарейный эмульгатор II-го поколения + ЭФ ЭГА 1-40-12-6-4	165,9	99,95	5,5

После улучшающих мероприятий суммарные выбросы составляют $61,2 \text{ мг/м}^3$, что немного хуже результатов мокрых скрубберов, но в целом удовлетворяет требованиям НУВ. Таким образом, выбросы удалось снизить в 15 раз.

Схема выбранного электрофильтра (ЭГА) изображена на рисунке 22.

Однако, такой вариант требует больших затрат: электрофильтр (1 штука) имеет большие габариты и требует отдельной пристройки близ котельного цеха.

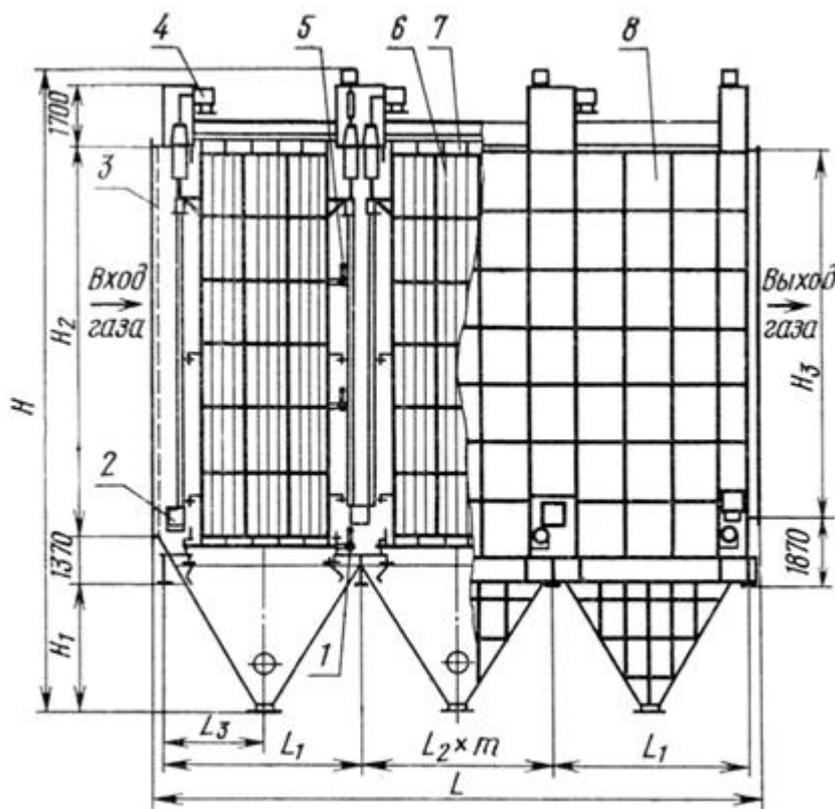


Рисунок 22 – Электрофильтр типа ЭГА, где:

1 – механизм встряхивания осаждающих электродов; 2 – люк обслуживания; 3 – газораспределительная решетка; 4 – защитная коробка для подвода тока; 5 – механизм встряхивания коронирующих электродов; 6 – коронирующий электрод; 7 – осаждающий электрод; 8 – корпус.

2.6 Анализ результатов расчётов и альтернативных решений

В ходе расчётов было установлено, что следует применять двухэтапное золоулавливания с использованием разного оборудования или комбинированием методов очистки. Таким образом, аппараты компенсируют недостатки друг друга.

1. ЗУ Томской ГРЭС-2 + мокрый скруббер:

ЗУ Томской ГРЭС-2 в сочетании со скруббером Вентури МС 4500, подобранным с оптимальными параметрами (скорость дымовых газов) для рассматриваемого топлива (каменный уголь Кузнецкого месторождения), имеют высокую степень очистки. Суммарные выбросы со всех котлов составляют $53,3 \text{ мг/м}^3$ (снижение выбросов в 18 раз). Такое решение обеспечивает запас по ПДВ в случае ужесточения требований к ним.

2. ЗУ Томской ГРЭС-2 + ЭФ:

Комбинированное использование ЗУ Томской ГРЭС-2 и ЭФ типа ЭГА так же имеет высокую степень очистки. Суммарные выбросы составляют $61,2 \text{ мг/м}^3$ (снижение выбросов в 15 раз). Однако на Томской ГРЭС-2 нецелесообразно размещение габаритного электрофильтра (при меньшей степени очистки, чем при установке скруббера Вентури).

3. Батарейные циклоны + ЗУ Томской ГРЭС-2:

Первичная фильтрация происходит в батарейных циклонах (крупные фракции золы), а вторичная – в мокрых скрубберах/эмульгаторах Томской ГРЭС-2 (фракции меньше 15 мкм, которые плохо улавливаются в циклонах). Таким образом, осуществляется надёжная и практически полная очистка дымовых газов. При этом циклоны являются самыми дешёвыми золоулавливающими устройствами, что делает это решение наименее затратным по капиталовложениям.

4. Переоборудование МЗУ Томской ГРЭС-2 в кольцевые эмульгаторы:

В данном случае необходимости демонтировать установленное оборудование, и не меняется способ очистки дымовых газов (мокрый метод), что определённо упрощает модернизацию системы золоулавливания.

Качественные (из титана) «завихритель» и «раскручиватель» кольцевых эмульгаторов являются дорогими элементами, однако, это выгоднее, чем закупать новую установку (например, скруббер или ЭФ).

5. ЗУ Томской ГРЭС-2 + сушильная установка + рукавный фильтр:

Так как в рукавном фильтре не рекомендуется очищать влажные газы, необходим их предварительный подогрев и сушка, что повышает расход электроэнергии. Но обеспечивается полная фильтрация дымовых газов, так как рукавные фильтры эффективно улавливают частицы любого диаметра. Также газовый тракт не будет подвергаться влажностной коррозии. С другой стороны такая система требует больших финансовых вложений (обновление материалов рукавных фильтров раз в 4-5 лет; затраты на пристройку для и др.).

6. ЭФ+рукавный фильтр (доп. решение):

Так как ЭФ плохо улавливает частицы диаметром 10 мкм, рукавный фильтр будет производить остаточную очистку дымовых газов. Комбинация электрофильтра и рукавного фильтра (рисунок 23) в одном корпусе рекомендуется для электростанций, на которых предполагается переработка и отпуск потребителям золошлаковых материалов. Но для размещения этих устройств требуется большая площадь на территории станции (отдельной пристройки для оборудования). Такая система целесообразна только при проектировании новых ТЭС.

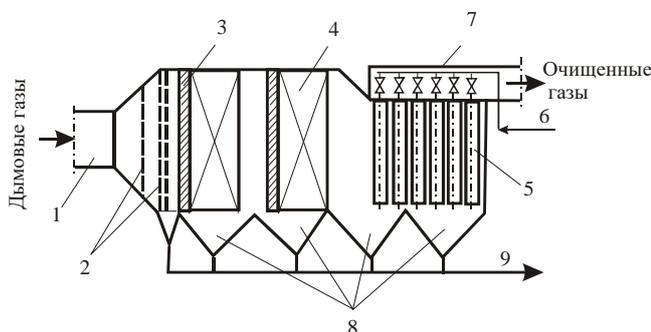


Рисунок 23 – Схема комбинированного золоуловителя:

1 – входной короб, 2 – распределительные решетки, 3 – ступень зарядки частиц в электрополе, 4 – ступень осаждения частиц в электрополе, 5 – рукавный фильтр, 6 – подвод сжатого воздуха, 7 – выходной короб, 8 – бункер, 9 – отвод уловленной золы.

Для наглядности результаты анализа сведены в таблицу 22.

Таблица 22 – Социальная эффективность вариантов модернизации системы золоулавливания Томской ГРЭС-2

Варианты модернизации	Характер расходов на реализацию мероприятия	Технические особенности	
		Преимущества	Недостатки
1. ЗУ Томской ГРЭС-2 + мокрый скруббер	Малозатратное	– Снижение суммарных выбросов золы в 18 раз; Простота монтажа	– Влажные ДГ на выходе (коррозия газохода); Повышение расхода воды на орошение
2. ЗУ Томской ГРЭС-2 +ЭФ	Многозатратное	– Снижение суммарных выбросов золы в 15 раз	– Большие габариты ЭФ; – Зависимость работы ЭФ от температуры дымовых газов; – Влажные ДГ на выходе
3. Батарейные циклоны + ЗУ Томской ГРЭС-2	Малозатратное	– Повышение эффективности очистки без усложнения системы золоулавливания	– Влажные ДГ на выходе
4. Переоборудование МЗУ Томской ГРЭС-2 в кольцевые эмульгаторы	Малозатратное	– Повышение эффективности очистки без установки новых аппаратов	– Большой расход воды на орошение; – Влажные ДГ на выходе
5. ЗУ Томской ГРЭС-2 + сушильная установка + рукавный фильтр	Многозатратное	– Эффективная очистка дымовых газов от фракций меньше 10 мкм; – Сухие ДГ на выходе	– Доп. затраты на электроэнергию сушильной установки; – Чрезмерное усложнение системы золоулавливания; – Замена материалов рукавного фильтра раз в 4-5 лет
6. ЭФ+рукавный фильтр	Многозатратное	– Практически полная очистка дымовых газов (особенно от частиц малых фракций); – Возможность перерабатывать ЗШО материалы; – Сухие ДГ на выходе (отсутствие коррозии в газоходе)	– Большие габариты аппаратов; – Замена материалов рукавного фильтра раз в 4-5 лет; – Явление «обратной короны» у ЭФ; – Повышенная пожароопасность рукавного фильтра при высоких температурах ДГ

Томской ГРЭС-2 нецелесообразно полностью изменять систему золоулавливания. Поэтому можно воспользоваться более простыми и малозатратными техническими решениями: подключение доп. скруббера Вентури, установка циклонов в начале ЗУ устройств или переоборудование имеющихся скрубберов в кольцевые эмульгаторы – которые повысят качество очистки ДГ и не добавят существенных побочных дефектов от преобразования системы ЗУ.

3. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Цель дипломной работы: анализ существующих технологий золоулавливания с целью повышения эффективности очистки дымовых газов.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является оценка модернизации системы золоулавливания Томской ГРЭС-2 с позиции ресурсоэффективности и конкурентоспособности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи [55]:

- определить потенциальных потребителей результатов проекта;
- проанализировать конкурентные технические решения проекта;
- выполнить SWOT-анализ проекта;
- провести инициацию проекта (разработка устава проекта);
- произвести планирование научно-исследовательских работ;
- разработать диаграмму Гантта;
- определить бюджет научного проекта;
- определить финансовую, социальную и сравнительную эффективность проекта.

3.1 Предпроектный анализ

3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Потенциальный потребитель результатов проекта только один акционерное общество «Томская генерация». Томская ГРЭС-2 – это структурное подразделение АО «Томская генерация». Томская генерация входит в группу компаний Интер РАО. Таким образом, потребители проекта Томская ГРЭС-2, АО «Томская генерация», группа компаний Интер РАО.

3.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Так как проект выполняется для конкретной тепловой станции, то и конкурентных технических решений на рынке нет. В создании подобных проектов могут нуждаться и другие аналогичные субъекты в других городах и регионах. Поэтому рассмотрим варианты модернизации.

Модернизация предусматривает несколько вариантов:

- установка дополнительных золоуловителей;
- замена старых золоуловителей на новое оборудование;
- замена старых золоуловителей на новое оборудование модернизированного типа;
- установка дополнительных золоуловителей модернизированного типа.

Замена старых золоуловителей на новое оборудование нецелесообразно. Основным дефектным элементом золоуловителей являются крыльчатки дымососов. Замена крыльчатки и их дефектация является частой операцией во время капитального ремонта. Установка новых золоуловителей не решает проблемы дефектации, а лишь отсрочивает замену крыльчатки, при этом кратно увеличиваются затраты на замену золоуловителей.

Замена старых золоуловителей на модернизированные снизит затраты на дефектацию. В настоящий момент существуют решения, при которых дефектация проводится без вскрытия корпуса золоуловителя, что несет существенную экономию при капитальном ремонте. Однако, капиталовложения по замене золоуловителей в данном случае многократно превышают стоимость дефектации. В основном это связано с периодичностью капитальных ремонтов золоуловителей, не реже 1 раза в месяц.

Составим карту для сравнения конкурентных технических решений (таблица 23). Анализ конкурентных технических решений (конкурентоспособность) определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

где:

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Таблица 23 – Карта для сравнения технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы				Конкур. способность			
		Б1	Б2	Б3	Б4	К1	К2	К3	К4
Легкость монтажа	0,025	10	10	10	10	0,25	100	100	100
Капиталовложения на монтаж	0,1	10	10	10	10	1	100	100	100
Затраты при дефектации	0,05	0	10	0	10	0	0	0	0
Надёжность	0,05	10	10	10	10	0,5	100	100	100
Удобство эксплуатации	0,025	10	10	10	10	0,25	100	100	100
Цена золоуловителя	0,1	5	10	5	10	0,5	50	50	50
Снижение затрат на тех. Процесс	0,3	0	0	10	10	0	0	0	100
Увеличение степени золоулавливания	0,3	0	0	10	10	0	0	0	100
Итого	1	45	60	65	80	2,5	450	450	650

где:

- Б1 – Балл технического решения №1 (замена старого золоуловителя на новый такого же типа);
- Б2 – Балл технического решения №2 (замена старого золоуловителя на новый модернизированного типа);
- Б3 – Балл технического решения №3 (установка дополнительного золоуловителя старого типа);
- Б4 – Балл технического решения №4 (установка дополнительного золоуловителя модернизированного типа);
- К1 – Конкурентная способность технического решения №1;
- К2 – Конкурентная способность технического решения №2;
- К3 – Конкурентная способность технического решения №3;
- К4 – Конкурентная способность технического решения №4.

Таким образом, можно сделать вывод, что выгоден вариант по установке нового дополнительного золоуловителя. Так как в этом случае капиталовложения компенсируются увеличением степенью золоулавливания, и, как следствие, появляется возможность сжигать более дешёвое топливо (т.е. экономия топлива). При этом если установить новый золоуловитель модернизированного типа, то затраты на дефектацию при капитальном ремонте значительно сократятся. Таким образом, выявлено наиболее правильное конкурентное решение (№4).

3.1.3 SWOT – анализ проекта

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта.

SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. С помощью SWOT-анализа возможно определить внутренние сильные и слабые стороны проекта, что позволяет оптимальным образом оценить его преимущества и недостатки. Кроме того, по своей структуре, SWOT-анализ позволяет сформулировать внешние факторы, влияющие на развитие проекта.

SWOT- анализ проекта представлен в таблице 24.

Таблица 24 – SWOT- анализ проекта

	Сильные стороны научного проекта: С.1. Улучшение экологических показателей станции. С.2. Сокращение издержек при ремонте оборудования. С.3. Сокращение издержек при дефектации оборудования. С.4. Инновационность. С.5. Сокращение сроков капитальных ремонтов оборудования.	Слабые стороны научного проекта: Сл.1. Сложность согласования внесения изменений в конструкцию оборудования. Сл.2. Отсутствие опыта проведения подобных проектов. Сл.3. Отсутствие моделирования при выполнении проекта. Сл.4. Отсутствие практических примеров внедрения подобных решений
Возможности: В.1. Использовать документацию оборудования В.2. Использовать опыт коллег В.3. Возможность наблюдать проектируемое оборудование в работе.	См. интерактивную матрицу №1	См. интерактивную матрицу №2

Продолжение таблицы 24

В.4. Использовать опыт руководителя для решения сложных задач В.5. Привлечения ресурсов университета для проекта.		
Угрозы: У.1. Не соблюдение сроков сдачи проекта. У.2. Отсутствие интереса у руководителей Томской ГРЭС-2 к проекту. У.3. Отсутствие интереса у руководителя У.4. Негатив со стороны стейкхолдеров У.5. Выполнения технически слабого проекта.	См. интерактивную матрицу №3	См. интерактивную матрицу №4

В интерактивной матрице №1 (таблица 25) представлены сильные стороны, а также возможности, которые можно использовать для усиления этих сильных сторон. Например, для улучшения экологических характеристик станции, при разработке проекта, следует использовать документацию на оборудование ТЭС. Тогда проект будет выполнен точнее, и характеристики расчетного оборудования будут соответствовать характеристикам уже имеющегося оборудования.

Таблица 25 – Интерактивная матрица №1

	Сильные стороны					
		C1	C2	C3	C4	C5
Возможности	B1	+	-	-	-	-
	B2	-	-	-	-	-
	B3	-	-	-	-	-
	B4	+	+	+	+	+
	B5	+	+	+	+	+

В интерактивной матрице №2 (таблица 26) представлены Слабые стороны, а также приведены возможности, с помощью которых, можно нивелировать эти слабые стороны. Например, одной из слабых сторон проекта является отсутствие опыта у исполнителя проведения подобных проектов. Чтобы отсутствие опыта не повлияло на качество проекта, следует использовать возможности: привлечь к работе коллег, выяснить на практике параметры работы оборудования, расходы топлива, его стоимость и т.д.

Также чаще советоваться с руководителем при выполнении проекта нивелирует отсутствие опыта проведения подобных проектов.

Таблица 26 – Интерактивная матрица №2

		Слабые стороны			
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
Возможности	В1	–	+	–	–
	В2	+	+	–	–
	В3	–	+	–	–
	В4	–	+	–	+
	В5	–	+	–	+

Существующие угрозы проекта (таблица 27) нужно подавлять с помощью сильных сторон. Так угрозу выполнения технически слабого проекта нивелирует то, что в результате выполнения будет результат сокращения издержек ремонтов. То есть техническую часть нивелирует экономическая.

Таблица 27 – Интерактивная матрица №3

		Сильные стороны				
		С1	С2	С3	С4	С5
Угрозы	У1	+	–	–	–	–
	У2	+	+	+	+	+
	У3	–	–	–	+	–
	У4	–	–	–	+	–
	У5	+	+	+	–	+

Угрозы и слабые стороны проекта (таблица 28) это то, чего нужно избегать. Например, отсутствие интереса у руководителя к проекту в сочетании с необходимостью исполнителя совмещать учебную, проектную и производственную деятельность может нести реальную угрозу провала проекта или нарушения сроков его выполнения.

Таблица 28 – Интерактивная матрица №4

		Слабые стороны			
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
Угрозы	У1	–	+	–	+
	У2	+	–	–	+
	У3	+	–	–	+
	У4	–	–	–	–
	У5	+	+	–	+

Таким образом, в результате SWOT-анализа были рассмотрены сильные (улучшение экологических показателей станции, сокращение

издержек при ремонте и дефектации оборудования) и слабые (отсутствие опыта в проведении проекта, отсутствие моделирования) стороны проекта по модернизации системы золоулавливания Томской ГРЭС-2.

В ходе чего установлено, что сильных сторон больше. Анализ интерактивных матриц, приведенных в таблицах 25-28, показывает равное соответствие сильных и слабых сторон с возможностями с угрозами. Но в данном случае угрозы имеют предсказуемый характер, что снижает риски провала проекта (например, отсутствие собственного опыта в проведении исследования нивелируется опытом руководителя), а совокупное использование имеющихся возможностей приведёт к положительным результатам реализации проекта.

3.2 Инициация проекта

3.2.1 Цели и результат проекта

В таблице 29 представлены цели и результаты проекта

Таблица 29 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	1. Повышение экологических показателей Томской ГРЭС-2; 2. Снижение затрат при дефектации, ремонте системы золоулавливания Томской ГРЭС-2.
Ожидаемые результаты проекта:	Перевод проекта из статуса учебного в статус производственного.
Критерии приемки результата проекта:	Получение одобрительной рецензии на учебный проект от руководителей Томской ГРЭС-2.
Требования к результату проекта:	Должны быть представлены варианты модернизации системы золоулавливания Томской ГРЭС-2.

Тема проекта: «Анализ существующих методов очистки дымовых газов ТЭС от вредных выбросов». Для наглядности анализа методов очистки дымовых газов рассматривается модернизация системы золоулавливания Томской ГРЭС-2, поэтому цели проекта были составлены приведённым выше образом. Так как проект является учебным, то ожидаемым результатом проекта является защита, в составе комиссии которой, должны присутствовать руководящие работники Томской генерации и Томской

ГРЭС-2. Критерием приемки будут считаться допуск к защите проекта и положительные рецензии руководителя и производителей.

В таблице 30 представлены заинтересованные стороны проекта.

Таблица 30 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Инженер	Защита дипломного проекта
Руководитель проекта	Реализация проекта с новой идеей
Руководители Томской ГРЭС-2	Возможность взять учебный проект на реализацию

Заинтересованными сторонами проекта выступают: исполнитель проекта (инженер), руководитель проекта, руководители ГРЭС. Для руководства Томской ГРЭС-2 это возможность увидеть новые возможности модернизации, а также, перспективных студентов – потенциальных работников.

3.2.2 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта представлена в таблице 31.

Таблица 31 – Рабочая группа проекта

№	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час
1	Бурцев Всеволод Валерьевич, инженер	Исполнитель проекта	Выполнять задания руководителя в полном объеме	3544
2	Матвеев Александр Сергеевич, директор ИШЭ	Руководитель проекта	Руководить проектом тактически и стратегически	260

Проект учебный, поэтому рабочая группа проекта состоит из руководителя проекта и исполнителя проекта.

3.2.3 Ограничения и допущения проекта

В таблице 32 представлены ограничения и допущения проекта.

Таблица 32 – Ограничения и допущения проекта

Фактор	Ограничения/допущения
Бюджет научного исследования	939,5 тыс. руб.
Бюджет оборудования, тыс. руб.	210 тыс. руб.
Источник финансирования	АО «Томская генерация»
Сроки проекта	С 27.02.2020 по 01.06.2021 г.
Форма проекта	Учебная

Таким образом, бюджет научного исследования составляет 939,5 тыс. руб. Затраты на заработную плату руководителя и исполнителя. Бюджет на разработку модернизированного золоуловителя (с учетом амортизационных отчислений) составляет 210 тыс. руб. Источником финансирования может стать АО «Томская генерация», так как это заинтересованная организация.

3.3 Планирование управления научно-техническим проектом

3.3.1 План проекта

Составим календарный график выполнения проекта (таблица 33).

Таблица 33 – Календарь план-график выполнения проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление технического задания	15	09.01.2020 г.	23.01.2020 г.	Руководитель
2	Изучение литературы	126	23.01.2020 г.	01.06.2020 г.	Исполнитель
3	Патентный поиск	61	01.09.2020 г.	01.11.2020 г.	Исполнитель
4	Изучение технической документации на проектируемое оборудование	60	01.11.2020 г.	31.12.2020 г.	Исполнитель
5	Анализ методов очистки и сравнительный расчёт оборудования ГРЭС	90	01.01.2021 г.	31.03.2021 г.	Исполнитель
6	Разработка социальной ответственности проекта	30	01.04.2021 г.	31.03.2021 г.	Исполнитель
7	Разработка финансового менеджмента проекта	15	01.05.2021 г.	15.05.2021 г.	Исполнитель
8	Разработка части проекта на иностранном языке	30	01.05.2021 г.	30.05.2021 г.	Исполнитель
9	Получение допуска проекта к защите	30	25.05.2021 г.	05.06.2021 г.	Исполнитель
10	Защита проекта	1	10.06.2021 г.	10.06.2021 г.	Исполнитель

Календарный план в дальнейшем представлен диаграммой Гантта (таблица 34) для упрощения работы с ним.

Таблица 34 – Диаграмма Гантта

Код работы	Вид работы	Исполнитель	Т _{кол} календарных дней	Продолжительность выполнения работ															
				01.20	02.20	03.20	04.20	05.20	06.20	09.20	10.20	11.20	12.20	01.21	02.21	03.21	04.21	05.21	06.21
1	Состав тех. Задания	Руководитель	15	■															
2	Изучения литературы	Исполнитель	126	■	■	■	■	■	■	■									
3	Патентный поиск	Исполнитель	61						■	■	■								
4	Изучение тех-ой документации на проектируемое оборудование	Исполнитель	60								■	■	■						
5	Анализ методов очистки и сравнительный расчёт оборудования ГРЭС	Исполнитель	90									■	■	■	■				
6	Разработка социальной менеджмента проекта	Исполнитель	30												■	■			
7	Разработка финансового менеджмента проекта	Исполнитель	15														■		
8	Разработка части проекта на иностранном языке	Исполнитель	30														■	■	
9	Получение допуска проекта к защите	Исполнитель	30															■	
10	Защита проекта	Исполнитель	1															■	

Руководитель: ■ Исполнитель: ■

Таким образом, диаграмма Гантта демонстрирует, что изучение литературы по теме является самым продолжительным видом работ. Полная длительность проекта составляет 458 дней, из них – 15 дней приходится на работу руководителя.

3.3.2 Бюджет проекта

3.3.2.1 Расчёт материальных затрат на выполнение ВКР

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх.}i},$$

где:

- m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;
- $N_{\text{расх.}i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении ВКР;
- C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов;
- k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Основные работы для ВКР проводились за персональным компьютером в квартире жилого дома. Время, проведенное за работой у компьютера, примем равным 350 часам. Мощность компьютера: 0,4 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{\text{эл}} \cdot P \cdot T_{\text{об}} = 2,56 \cdot 0,4 \cdot 350 = 358,4 \text{ руб.}$$

где:

- $C_{\text{эл}}$ – одноставочный тариф на электроэнергию для населения, проживающего в городских населенных пунктах Томской области в домах, оборудованных в установленном порядке электрическими плитами (2,56 руб. за 1 кВт·ч);
- P – мощность оборудования, кВт;
- $T_{\text{об}}$ – время использования оборудования, часов.

Затраты на электроэнергию составили 358,4 рубля.

Все затраты сведём в таблицу 35.

Таблица 35 – Материальные затраты на выполнение ВКР

Наименование	Ед. измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты, руб.
Бумага	упак.	1	235	235
Шариковая ручка	шт.	1	50	50
Эл. Энергия	кВт·ч	350	2,56·0,4	358,4
Доступ в интернет	мес.	2	650	1300
Печать А4	шт.	160	3	480
Печать А1	шт.	6	70	420
Брошюрование	шт.	1	100	100
Транспортно-заготовительные работы (5%)				130
ИТОГО по статье материальных затрат				2715

Из таблицы 35 следует, что большая доля материальных затрат приходится на доступ в интернет.

3.3.2.2 Расчёт основной заработной платы

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада. Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением ВКР, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где:

- $Z_{осн}$ – основная заработная плата;
- $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

где:

- $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб;

- T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дней.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}}}{F_{\text{д}}},$$

где:

- $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;
- $F_{\text{д}}$ – количество рабочих дней в месяце (21 день).

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}},$$

где:

- $Z_{\text{б}}$ – базовый оклад, руб.;
- $k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{\text{тс}}$);
- $k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2-0,5 (в НИИ на промышленных предприятиях условия: 15-20 % от $Z_{\text{тс}}$);
- $k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 в г. Томск.

Расчёт заработной платы для руководителя:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 28990 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 56530,5 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}}}{F_{\text{д}}} = \frac{56530,5}{21} = 2691,9 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p = 2691,9 \cdot 15 = 40378,9 \text{ руб.},$$

Результаты расчётов представлены в таблице 36.

Таблица 36 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{б}}$, руб.	$Z_{\text{м}}$, руб.	$Z_{\text{дн}}$, руб.	T_p , дни	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Научный руководитель	28990	56530,5	2691,9	15	40378,9
Инженер	12700	24765	1179,3	442	521224,3
ИТОГО					561623,2

В таблице 36 продемонстрировано, что основная зарплата инженера в 13 раз, больше заработной платы руководителя, т.к. практически все работы

выполняются именно инженером. Из этого следует, что основная доля отчислений во внебюджетные фонды, накладных расходов будут так же приходиться на него.

3.3.2.3 Расчёт дополнительной заработной платы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется следующей формуле (для руководителя):

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 40378,9 = 6056,8 \text{ руб.},$$

где:

- $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается 0,1-0,15).

Результаты расчётов представлены в таблице 37.

Таблица 37 – Расчёт дополнительной заработной платы

Исполнители	Основная ЗП, руб.	Доп. ЗП, руб.
Научный руководитель	40378,9	6056,8
Инженер	521244,3	78186,6
	ИТОГО	84243,5

3.3.2.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Отчисления во внебюджетные фонды являются обязательными по установленным законодательством РФ нормам органа государственного соц. страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы (для руководителя):

$$С_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,302 \cdot (40378,9 + 6056,8) = 14023,6 \text{ руб.},$$

где:

- $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ в 2021 году установлен размер страховых взносов равный 30,2 %. Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 38.

Таблица 38 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	Внебюджетные фонды, руб.
Научный руководитель	14023,6
Инженер	181028,1
ИТОГО	195051,7

3.3.2.5 Накладные расходы

Накладные расходы составляют 16% от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы (инженер). Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,16 \cdot (521244,3 + 78186,6) = 95909 \text{ руб.},$$

где:

- $k_{\text{накл}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

3.3.2.6 Амортизационные отчисления

Для оборудования (модернизированный золоуловитель) необходимо рассчитать величину годовой амортизации по следующей формуле (результаты в таблице 39):

$$A_{\text{год}} = \frac{C_{\text{перв}}}{T_{\text{пи}}} = \frac{200000}{20} = 10000 \text{ руб.},$$

где:

- $C_{\text{перв}}$ – первоначальная стоимость, руб.;

- $T_{\text{пн}}$ – время полезного использования, год.

Таблица 39 – Затраты на оборудование

Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Сумма амортизационных отчислений, руб.
Модернизированный золоуловитель	1	200000	10000

3.3.2.7 Формирование бюджета затрат ВКР

Рассчитанная величина затрат ВКР является основой для формирования бюджета затрат проекта. Определение бюджета затрат на ВКР по каждому варианту исполнения приведено в таблице 40.

Таблица 40 – Расчёт бюджета затрат ВКР

Наименование статьи	Сумма, руб.	Удельный вес, %
Материальные затраты	2715	0,2
Затраты по основной ЗП	561623,2	48,9
Затраты по дополнительной ЗП	84243,5	7,3
Внебюджетные отчисления	195051,7	17,0
Дополнительные расходы	95909	8,3
Разработка оборудования	200000	17,4
Амортизационные отчисления	10000	0,9
ИТОГО, руб.	1149542,4	

Таким образом, из выше проведённых расчётов можно сделать вывод, что основные затраты проекта приходятся на основную заработную плату исполнителей (48,9 %) и разработку модернизированного золоуловителя (17,4 %). Для предотвращения доп. затрат на зарплату необходимо строго придерживаться заданного плана работ. Желательно, уложиться раньше конечных сроков.

3.4 Определение финансовой, социальной и сравнительной эффективности исследования

3.4.1 Оценка финансовой эффективности

АО «Томская генерация» производит 2 вида энергии это тепловая и электрическая. Для производства энергии требуются затраты на собственные нужды. В таблице производственные показатели представлены данные по

потреблению топлива и тепловой и электрической энергии на работу станций.

В таблице 41 показаны основные финансовые показатели деятельности общества.

Таблица 41 – Основные финансовые показатели деятельности общества

Наименование показателя	Единица измерения	2019 год	2020 год	% изменения
Выработка электрической энергии	млн. кВт·ч	1856,7	1555,8	-16,2
Отпуск тепловой энергии	тыс. Гкал	5017,9	4614	-8
Коэффициент использования установленной электрической мощности (КИУМ)	%	43,6	36,6	-16,1
Удельный расход условного топлива на отпуск электрической энергии	г/кВт·ч	291,3	399	2,7
Удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии	кг/Гкал	136,1	138,7	1,9
Выручка	Млн. руб.	7430	7391	-0,5
Производственные затраты	Млн. руб.	6947	6667	-4
Коэффициент финансовой независимости	Отн. Ед.	0,57	0,55	-4,6
Норма чистой прибыли	%	5,42	-0,92	-116,9

В 2020 году выручка от продаж составила 7 391 млн. руб. В структуре выручки наибольшая доля в 2020 году приходится на основную продукцию АО «Томская генерация» электрическую энергию и мощность, тепловую энергию (47% и 50,6% от суммарной выручки соответственно).

Производственные затраты в 2020 году составили 6 667 млн. руб., их снижение относительно 2019 года составило 4%.

В 2020 году в структуре производственных расходов АО «Томская генерация» существенных изменений по сравнению с прошлым годом нет: традиционно, около 2/3 от всех затрат на производство и реализацию тепловой и электрической энергии занимают материальные затраты и расходы, связанные с работами и услугами производственного характера.

Из анализа показателей финансово-экономической деятельности АО «Томская генерация» за 2019-2020 года следует, что Общество имеет удовлетворительное финансовое состояние, достаточный объем собственного капитала для исполнения краткосрочных обязательств, несмотря на снижение нормы чистой прибыли в 2020 году.

В последующие 5 лет (2021-2025 гг.) Общество планирует осуществить инвестиции в форме капитальных вложений в объеме:

Финансирование – 2 568 439 тыс. руб. с НДС;

Освоение – 2 156 361 тыс. руб. без НДС;

Ввод – 2 194 542 тыс. руб. без НДС.

Таким образом, модернизация системы золоулавливания Томской ГРЭС-2 вполне может рассматриваться в качестве инвестиционного проекта по улучшению станции.

3.4.2 Оценка социальной эффективности проекта

Социальная эффективность проекта учитывает социальные эффекты после осуществления проекта, как для конкретной единицы оборудования, компании, так и для смежных единиц.

Оценка социальной эффективности проекта приведена в таблице 42.

Таблица 42 – Критерии социальной эффективности проекта

До	После
Высокая цена топлива.	Снижение стоимости используемого топлива уменьшает финансовые расходы на сырьё.
Большие затраты на дефектацию, как следствие увеличение загрязнения (отходы в результате дефектации).	Возможность дефектации без вскрытия корпуса золоуловителя, как следствие, уменьшение загрязненной ветоши, металлических отходов, человеческих трудозатрат.
Вскрытие корпуса золоуловителя во время ремонта, влечет за собой большое количество отходов.	Возможность провести дефектацию без вскрытия сокращает затраты на ремонт и уменьшает расход человекочасов.
Большое количество дефектных деталей в золоуловителе влечёт за собой увеличение отходов деталей.	Новое оборудование не требует затрат при ремонтах в ближайшие годы.
Большие затраты на собственные нужды.	Снижение затрат на собственные нужды входит в политику бережливого производства компании, работники станции получают материальные стимуляции за выполнение обязанностей.
Устаревшее оборудование.	Установка нового оборудования влечет создание новых рабочих мест.

Таким образом, по приведённой выше таблице можно сделать вывод, что проект в полной мере удовлетворяет потребности и интересы АО «Томская Генерация».

3.4.3 Оценка сравнительной эффективности проекта

Сравним эффективность текущего проекта и аналогов по следующим

критериям: интегральный финансовый показатель разработки, интегральный показатель ресурсоэффективности разработки, интегральный показатель эффективности, сравнительная эффективность вариантов разработки.

Интегральный показатель эффективности позволяет оценить проект с точки зрения двух величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности. Интегральный финансовый показатель разработки определяется как (для текущего проекта):

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}} = \frac{200000}{200000} = 1,$$

где:

- I_{Φ}^p – интегральный финансовый показатель разработки;
- Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения проекта, руб.;
- Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения, руб.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения проекта можно определить (для текущего проекта):

$$I_T^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p = 5 \cdot 0,025 \cdot 2 + 5 \cdot 0,1 \cdot 2 + 5 \cdot 0,05 \cdot 2 + 5 \cdot 0,3 \cdot 2 = 4,75,$$

где:

- I_T^p – интегральный показатель ресурсоэффективности проекта;
- a_i – весовой коэффициент i -го параметра;
- b_i^p – бальная оценка i -го параметра для аналога и разработки.

Составим таблицу для определения интегрального показателя ресурсоэффективности (таблица 43).

Таблица 43 – Сравнительная оценка вариантов исполнения проектов

Критерии оценки	Вес коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2	Аналог 3
Легкость монтажа	0,025	5	5	5	5
Капиталовложения на монтаж	0,1	5	5	5	5

Продолжение таблицы 43

Экономия на дефектацию	0,05	5	0	5	0
Надежность	0,05	5	5	5	5
Удобство эксплуатации	0,025	5	5	5	5
Цена золоуловителя	0,1	5	3	5	3
Снижение затрат на тех. процесс	0,3	5	0	5	1
Повышение эко показателей станции	0,3	5	2	3	1
ИТОГО	1	40	25	38	25

где:

- Текущий проект – техническое решение №4 (установка дополнительного золоуловителя модернизированного типа);
- Аналог 1 – техническое решение №3 (установка дополнительного золоуловителя обычной конфигурации);
- Аналог 2 – техническое решение №2 (замена старого золоуловителя на модернизированный тип);
- Аналог 3 – техническое решение №1 (замена старого золоуловителя на новое оборудование, но такой же конфигурации).

Максимальная стоимость проекта в данном случае связана с затратами на разработку модернизированного золоуловителя, к тому же, место установки требует согласования с заводом изготовителем. Таким образом, текущий проект является самым дорогим.

Интегральный показатель эффективности разработки проекта определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности проекта и интегрального финансового показателя, по формуле (для текущего проекта):

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_{\text{т}}^p}{I_{\text{ф}}^p} = \frac{4,75}{1} = 4,75.$$

Далее определим сравнительную эффективность проекта, по формуле (для текущего проекта):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a} = \frac{4,75}{3,8} = 1,25.$$

Сведем расчеты всех показателей в таблицу 44.

Таблица 44 – Сравнительная эффективность разработки

Показатель	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2	Аналог 3
Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,5	1	0,5
Интегральный показатель ресурсоэффективности проекта	4,75	1,9	4,15	1,9
Интегральный показатель эффективности разработки проекта	4,75	3,8	4,15	3,8
Сравнительная эффективность проекта	1.25	0,92	1,09	0,8

Таким образом, анализ, приведённый выше, демонстрирует, что текущее решение по установке дополнительного золоуловителя модернизированного типа в рассматриваемом проекте является наиболее ресурсоэффективным по сравнению с другими вариантами.

Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Проект модернизации системы золоулавливания Томской ГРЭС-2 узконаправлен, не имеет как такового коммерческого потенциала и конкурентов. Однако, может быть реализован как инвестиционный проект АО «Томская генерация», в состав которой входит Томская ГРЭС-2.

2. Проведён анализ конкурентных технических решений. В данной работе были комплексно рассмотрены четыре варианта модернизации оборудования. По ряду критериев было выявлено, что установка дополнительного золоуловителя модернизированного типа является наиболее перспективным решением, т.к. произойдёт сокращение затрат на дефектацию при капитальном ремонте.

3. В результате SWOT-анализа было установлено, что сильные стороны технического проекта (сокращение издержек при ремонте, дефектации оборудования, инновационность) преобладают над слабыми аспектами, а угрозы имеют предсказуемый характер. Также за счёт опыта руководителя в сфере модернизации оборудования можно избежать «столкновения» со слабыми сторонами проекта (сложность согласования внесения изменений в конструкцию оборудования, отсутствие моделирования). Таким образом, повышается концентрация на сильных моментах исследования.

4. В ходе инициации проекта были определены цели (повышение экологических характеристик станции, снижение затрат на дефектацию золоулавливающего оборудования) и ожидаемые результаты проекта (перевод в статус производственного). Помимо этого установлены заинтересованные стороны исследования (руководство ГРЭС) и обозначены его допущения (сроки и форма проекта). Наличие перечисленных факторов позволяют обоснованно принять решение о начале исследовательских работ.

5. При планировании научного исследования была описана структура проекта, определен объем работ и составлен их план-график, в который входит 10 пунктов. Деление целого исследования на отдельные задачи с указанными сроками помогает ориентироваться в рабочем процессе, что делает его эффективным.

6. Для наглядной иллюстрации плана работы была составлена диаграмма Ганта. В ней отражены этапы планирования и моделирования варианта работы. По данной диаграмме самым продолжительным видом работ является – изучение спец. литературы (126 дней из 458 дней). При этом основная часть работ выполняется инженером.

7. Бюджет оборудования для модернизации составляет 1149,5 тыс. руб. Большая часть бюджета идёт на основную заработную плату исполнителей (48,9 %), что говорит о необходимости строго придерживаться заданного регламента работ. В случае его перевода из учебного в статус

производственного источником финансирования будет являться АО «Томская генерация», и бюджет проекта будет обусловлен инвестиционной программой компании.

8. Обзор финансовой деятельности компании продемонстрировал её способность к инвестированию в непродолжительные проекты (таким является рассматриваемое исследование). К тому же оценка социальной эффективности проекта показала, что данная разработка является перспективной, т.к. удовлетворяет интересы АО «Томская генерация». Анализ ресурсоэффективности проекта, проведенный по интегральному показателю, дал высокий результат (4,75 по 5-балльной шкале), что говорит о более успешной реализации технического проекта по сравнению с аналогами.

4. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

Сущность проекта заключается в анализ существующих технологий золоулавливания с целью повышения эффективности очистки дымовых газов на примере системы золоулавливания Томской ГРЭС-2 (тепловая электростанция АО «Томская генерация»).

В качестве рассмотрения возьмем рабочее место начальника смены котлотурбинного цеха (КТЦ), которое находится на блочном щите управления (БЩУ), через который помимо прочего контролируется система золоулавливания.

Персонал, обслуживающий оборудование станции, может находиться под воздействием каких-либо вредных и опасных производственных факторов. К таким факторам относятся: отклонение показателей микроклимата, превышение уровня шума, повышенным уровнем общей вибрации, недостаточная освещенность рабочей зоны, факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает рабочий.

В данном разделе рассмотрим источники вредных и опасных производственных факторов, нормы воздействия и мероприятия для снижения уровня воздействия.

4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Основная задача по созданию безопасных условий труда и защите окружающей природной среды возложена на администрацию предприятия и инженерные кадры, которые обязаны выявлять и предупреждать, ограничивать или устранять опасные и вредные факторы производства.

На БЩУ размещается рабочее место начальника смены КТЦ, включающее в себя: панели управления энергоблоком, предназначенные для контроля и управления подсистемами котельного и турбинного отделения.

Система оплаты труда, включая размеры тарифных ставок, окладов (должностных окладов), доплат и надбавок компенсационного характера, система доплат и надбавок стимулирующего характера и системы премирования устанавливаются коллективными договорами, соглашениями, локальными нормативными актами в соответствии с трудовым законодательством [56, статья 144] и иными нормативными правовыми актами, содержащими нормы трудового права. Условия труда отклоняются от нормы, т.к. работы могут происходить в ночное время, выходные и нерабочие праздничные дни [56, статья 149].

Трудовое законодательство определяет, что нормальная продолжительность рабочего времени для работника не может превышать 40 часов в неделю [56, статья 91].

Основными принципами обязательного социального страхования от несчастных случаев, согласно [56, статья 212], на производстве и профессиональных заболеваний являются:

- гарантированность права застрахованных лиц на обеспечение по страхованию;
- обязательность регистрации в качестве страхователей всех лиц, подлежащих обязательному социальному страхованию от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- обязательность уплаты страхователями страховых взносов.

Работнику должен предоставляться ежегодный отпуск с сохранением места работы (должности) и среднего заработка [56, статья 114].

АО «Томская генерация», а в частности Томская ГРЭС-2 обязуется обеспечить сотрудников рабочим местом [56, статья 219].

Основным рабочим положением начальника смены КТЦ является положение сидя. Рабочее место для выполнения работ в положении сидя организуется в соответствии с [57]. В этом пространстве начальник смены проводит большую часть своего времени.

Так, при организации рабочего места начальника смены КТЦ должны соблюдаться следующие условия:

- требуемое для работы оборудование должно быть оптимально размещено;
- рабочее пространство должно быть достаточным и позволять производить необходимые движения в ходе работы;
- для выполнения поставленных задач необходимо наличие естественного и искусственного освещения;
- рабочее пространство должно быть достаточно вентилируемым.

Эргономичность – главное требование при проектировании рабочего места начальника смены КТЦ.

4.2 Производственная безопасность

К опасным производственным факторам относят те, которые приводят работника к травме; к вредным факторам – те, которые приводят к заболеванию.

В котлотурбинном цехе ТЭС, так же, как и на всей ТЭС в целом, имеются опасные и вредные производственные факторы. В таблице 45 приведены возможные опасные и вредные производственные факторы, влияющие на человека при эксплуатации энергоблока.

Таблица 45 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ	Нормативные документы
	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [3];
2. Превышение уровня шума	+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности» [4];
3. Недостаточная освещённость рабочей зоны	+	СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» [6];
4. Повышенный уровень вибрации	+	СН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация...» [7];
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	ГОСТ 12.1.038-82. «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов» [8].

Далее представлен анализ рабочего места начальника смены КТЦ на предмет возникновения вредных и опасных производственных факторов.

4.2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов

4.2.1.1 Отклонение показателей микроклимата

Источник возникновения фактора – энергозатраты организма 151 – 200 ккал/ч, связанные с постоянной ходьбой, перемещением мелких (до 1 кг) изделий или предметов в положении стоя или сидя и требующие определенного физического напряжения, при работе в турбинном цеху.

Физическая природа – изменение температуры воздуха и теплового излучения.

Выполняемые работы начальником смены по энергозатратам относятся к категории Ia с низкими энергозатратами.

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих от источников излучения, нагретых до белого и красного свечения, не должны превышать 140 Вт/м². При этом облучению не должно подвергаться более 25% поверхности тела.

Температура воздуха на рабочих местах не должна превышать 25 °С при категории работ Ia, при наличии источника теплового излучения.

Неблагоприятные микроклиматические условия приводят к ухудшению самочувствия работника, ослаблению внимания, быстрой утомляемости, и при продолжительном воздействии могут вызвать различные заболевания, регламентируют нормы производственного микроклимата [58].

Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны начальника смены представлены в таблице 46; нормы подачи свежего воздуха в помещения, где расположены компьютеры, показаны в таблице 47.

Таблица 46 – Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны начальника смены

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia	22...24	16...24	40-60	0,1
Теплый	Ia	23...25	14...27	40-60	0,1

Таблица 47 – Нормы подачи свежего воздуха в помещениях, где расположены компьютеры

Характеристики помещения	Объёмный расход подаваемого в помещение свежего воздуха, м ³ на одного человека в час
Объём до 20 м ³ на человека	Не менее 30
20...40 м ³ на человека	Не менее 20
Более 40 м ³ на человека	Естественная вентиляция

Для обеспечения комфортных условий используются: как и организационные методы (рациональная организация проведения работ в зависимости от времени года и суток, чередование труда и отдыха), так и технические средства (вентиляция, кондиционирование воздуха, отопительная система).

К индивидуальным средствам защиты от отклонений микроклимата может относиться одежда, обеспечивающая комфорт при определённых климатических условиях.

4.2.1.2 Превышения уровня шума

Основными источниками шума являются агрегаты: машины с неуравновешенными вращающимися массами, т.е. турбогенераторы, насосы, вентиляторы и установки, в которых перемещение жидкостей и газов происходит с большими скоростями и сопровождается пульсациями (барабаны котла).

В результате длительного воздействия шума на человека нарушается нормальная деятельность сердечнососудистой и нервной системы, пищеварительных и кроветворных органов, развивается профессиональная тугоухость, прогрессирование которой может привести к полной потере слуха.

Согласно [59] уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц, для вида трудовой деятельности (работа, требующая сосредоточенности; в помещениях с шумным оборудованием) составляют (таблица 48):

Таблица 48 – Уровни звукового давления

Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
дБА	103	91	83	77	73	70	68	66	64

Уровни звука и эквивалентные уровни звука – 75 дБА. Превышение уровня звука в котлотурбинном цехе примерно на 10дБ, однако в непосредственной близости к котлу и прочему оборудованию может достигать 18дБ.

Превышение уровня шума приводит к ухудшению слуха у работника, приводит к стрессу, а также повышает кровяное давление.

К средствам защиты от шума относятся:

- коллективные – формирование защищённых от шума зон (отдельная операторная КТЦ, спец. отделка стен материалами), целесообразное размещение оборудования рабочих мест;
- индивидуальные – робки, наушники (снижают уровень шума до 10-45 Дб), заглушки, вкладыши и шлемы.

4.2.1.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

При эксплуатации энергоблока начальник смены следит за состоянием оборудования на мониторах ПЭВМ. Помещения для ПЭВМ должны иметь естественное, искусственное и совмещённое освещение.

Плохое освещение негативно влияет на зрение человека, приводит к быстрому утомлению, снижает работоспособность, является причиной головной боли и бессонницы.

В данных условиях разряд зрительной работы – 4г (работа средней точности). К освещению рабочих мест, оборудованных персональным компьютером, применяются следующие требования (таблица 49):

Таблица 49 – Требования к освещению рабочего места, оборудованного ПЭВМ

Параметр	Значение параметра
Освещённость на рабочем месте, лк	300-500
Освещённость на экране, лк	Не выше 300
Блики на экране, кд/м ²	Не выше 40
Прямая блескость источника света, кд/м ²	200
Отношение яркости между рабочими поверхностями	3:1-5:1
Отношение яркости между поверхностями стен и оборудования	10:1

Естественное освещение организовано через оконный проем размером 1,3×2,8м.

Выполним расчет общего равномерного искусственного освещения по методу светового потока [60] для рассматриваемого помещения длиной $A = 3$ м, шириной $B = 2,1$ м, высотой $H = 4$ м. Необходимо создать освещенность $E_n = 300$ лк. Согласно отраслевым нормам освещенности уровень рабочей поверхности над полом составляет $h_{рп} = 0,8$ м.

Световой поток ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z \cdot \frac{100}{n \cdot \eta}, \text{ лм,}$$

где:

- E_n – нормируемая минимальная освещённость по [61], лк;
- S – площадь освещаемого помещения, м²;
- K_3 – коэффициент запаса, учитывающий старение ламп и загрязнение светильников, при малом выделении пыли $K_3 = 1,5$;
- Z – коэффициент неравномерности освещения. Для люминесцентных ламп при расчётах составляет $Z = 1,1$;
- n – число ламп в помещении;
- η – коэффициент использования светового потока, %.

Так как поверхность стен окрашена в серый цвет, свежепобеленные с окнами без штор, то коэффициент отражения поверхности стен $\rho_{ст} = 50\%$. Поверхность потолка также свежепобеленная, поэтому коэффициент отражения поверхности потолка $\rho_{п} = 70\%$ [60, табл. 12].

Выбираем светильник типа ОД-2-80 с количеством ламп $N = 2$ шт.

Высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = H - h_{\text{рп}} = 4 - 0,8 = 3,2 \text{ м.}$$

Индекс помещения:

$$i = S / (h \cdot (A + B)) = (3 \cdot 2,1) / (3,2 \cdot (3 + 2,1)) = 0,39.$$

Учитывая $\rho_{\text{ст}}$, $\rho_{\text{п}}$, i определяем значение коэффициента использования светового потока по [60, табл. 14]: $\eta = 31\%$.

Потребный световой поток ламп:

$$\Phi = 300 \cdot 3 \cdot 2,1 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot \frac{100}{2 \cdot 31} = 5030 \text{ лм.}$$

По [60, табл. 1] выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛБ-80 с потоком 5200 лм. Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq [(\Phi_{\text{л.станд.}} - \Phi_{\text{л.расч.}}) / \Phi_{\text{л.станд.}}] \cdot 100\% \leq +20\%,$$

$$-10\% \leq [(5200 - 5030) / 5200] \cdot 100\% \leq +20\%,$$

$$-10\% \leq 3,3\% \leq +20\%.$$

Световой поток лампы не выходит за пределы диапазона ($-10\% \div +20\%$), поэтому нет необходимости далее корректировать число светильников и ламп.

4.2.1.4 Повышенный уровень вибрации

По способу передачи воздействия вибрация подразделяется на: общую вибрацию всего тела (передается через опорные поверхности) и локальную (передается на руки при работе с ручными машинами).

Причиной возникновения вибраций являются возникающие при работе машин и агрегатов неуравновешенные силовые воздействия (золуловители, насосы, вентиляторы).

Документом [62] предусматриваются следующие нормы (таблица 50):

- категория вибрации по санитарным нормам и критерий оценки: 3, тип «а»;
- граница снижения производительности труда. Это технологическая

вибрация воздействующие на операторов стационарных машин и оборудования или передающаяся на рабочие места, не являющиеся источниками вибраций, направление действия Z_0 , Y_0 , X_0 .

Таблица 50 – Санитарные нормы спектральных показателей вибрационной нагрузки на оператора, общая вибрация, категория 3, тип «а»

Среднегеометрические частоты полос, Гц	Нормативные значения в направлениях X_0 , Y_0			
	Виброускорения		Виброскорости	
	дБ		дБ	
	в 1/3 окт.	в 1/1 окт.	в 1/3 окт.	в 1/1 окт.
2,0	98	103	102	108
4,0	95	100	93	99
8,0	95	100	87	93
16,0	101	106	87	92
31,5	107	112	87	92
63,0	113	118	87	92
Нормативные, скорректированные по частоте и эквивалентные скорректированные значения	100		92	

Нормы локальной вибрации согласно [63] представлены в таблице 51.

Таблица 51 – Нормы локальной вибрации

Допустимые уровни локальной вибрации относительно установленных санитарных норм	Допустимое суммарное время воздействия локальной вибрации агрегатов за смену
дБ	мин
0	480
3	240
6	120
9	60
12	30

Длительное воздействие вибрации на человека вызывает вибрационную болезнь, болезнь сердечнососудистой и нервной системы [63].

К средствам защиты от вибрации относятся:

- коллективные – снижение вибрации в источнике (улучшение конструкции машин), виброизоляция (применение виброизоляторов пружинных, гидравлических, пневматических, резиновых и др.);
- индивидуальные – виброзащитные обувь, перчатки со специальными упругодемпфирующими элементами, поглощающими вибрацию.

4.2.1.5 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

Согласно [64], в отношении опасности поражения людей электрическим током БЦУ относится к классу 1 – помещения без повышенной опасности (сухие, безпыльные, с нормальной температурой воздуха, с изолирующими полами). Безопасные номинальные значения: напряжение – менее 12В; ток – менее 0,1А; заземление менее 4 Ом.

Помещения котлотурбинных цехов относятся к категории особо опасных, т.к. помещение характеризуется наличием токопроводящих полов (металлические), повышенной температурой в котельном цехе, наличие заземления, большого количества оборудования (электрофильтры, компрессоры и т.д.).

По источнику [64] допустимое значение напряжения прикосновения переменного тока частотой 50 Гц составляет 2 В, а силы тока – 0,3 мА; для постоянного тока значения указаны в таблице 52.

Таблица 52 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме электроустановок с частотой тока 50 Гц и напряжением до 1000 В

Продолжительность воздействия t, с	Нормируемая величина	
	U, В	I, мА
От 0,01 до 0,08	220	220
0,5	50	50
1	25	25

Опасное и вредное воздействия на людей электрического тока, электрической дуги и проявляются в виде электротравм (ожоги, электролиз и т.д.) и профессиональных заболеваний (тромбоз и т.д.).

К средствам защиты от электрического тока относятся:

- индивидуальные – спецодежда (перчатки и прочее), изготовленная из материалов, которые не проводят электричество (из резины);
- коллективные – защитные ограждения; заземление, зануление и отключение корпусов электрооборудования, которые могут быть под напряжением; применение безопасного напряжения 12-36 В.

4.2.2 Обоснование мероприятий по снижению воздействия

4.2.2.1 Отклонение показателей микроклимата

Поддержание оптимальных величин температуры и влажности воздуха рабочей зоны обеспечивается приточной и вытяжной вентиляцией. Вентиляторы включаются автоматически при достижении температуры в помещении 33°C и отключаются при температуре 25 °С. Также способами защиты от лучистого потока теплоты являются: 1) теплоизоляция нагретых поверхностей; 2) экранирование тепловых излучений; 3) применение защитной спец. одежды.

Для теплоизоляции оборудования применяют разнообразные материалы и конструкции (специальные бетоны и кирпич, минеральную и стекловату, асбест и т.д.). Все поверхности нагрева обмуровываются специальным раствором, а на поверхности, к которым необходим доступ во время работы, накладываются «подушки» из стекловаты.

4.2.2.2 Превышения уровня шума

Для снижения повышенного уровня шума произведены следующие мероприятия: в турбинном зале выполнена отдельно стоящая операторная с постоянным пребыванием рабочего персонала, отделка стен материалами предусматривает защиту от внешних источников шума, не превышая его уровня 40 дБ.

Для обслуживающего персонала используются индивидуальные средства защиты: противοшумы (ушные пробки, тампоны), наушники и шлемы, позволяющие снизить уровень шума на 10-45 дБ.

4.2.2.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

В качестве осветительных приборов в рассматриваемое помещение устанавливаются люминесцентные лампы типа ЛБ (белой цветности).

При организации освещения необходимо:

- обеспечить равномерное распределение яркости на рабочей поверхности и окружающих предметах;
- для улучшения видимости в поле зрения рабочего исключить прямую и отраженную блескость;
- при наличии зон с недостаточным искусственным освещением изменять размещение рабочих мест с их переносом в зону с достаточным уровнем естественного освещения.

Также могут использоваться собственные осветительные приборы (переноски, фонари) для доступа в плохо освещенные места.

4.2.2.4 Повышенный уровень вибрации

Для снижения уровня вибрации оборудования (золуловителей, насосов, вентиляторов электрических машин и т.д.) предусмотрено: ограничение окружной скорости рабочих колес вентиляторов и скорости движения воздуха; изолирование воздухопроводов; предусмотрена конструкция пола с прокладкой между ним и фундаментом пористой резины и др.

4.2.2.5 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

Все защитные средства, применяемые в электроустановках, делят на три группы: изолирующие, ограждающие и вспомогательные.

Средства коллективной защиты: обеспечивают недоступность токоведущих частей, чтобы не было случайного прикосновения к ним; применяют изоляцию корпуса; снижают напряжение до малой величины; используют защитное заземление; организуют безопасную эксплуатацию электроустановок.

4.3 Экологическая безопасность

Для производства энергии требуется сжигания топлива, поэтому загрязнение окружающей среды отходами производства неизбежно.

Основными требованиями для создания экологически чистых тепловых электростанций являются [65]:

- выбросы оксидов серы (SO_x) – не более 200...300 мг/нм³;
- выбросы оксидов азота (NO_x) – не более 150...200 мг/нм³;
- выбросы золовых частиц – не более 50 мг/нм³;
- очищение жидких стоков от ТЭС – 100%;
- доля используемой золы и других твердых отходов – не менее 80%.

4.3.1 Защита атмосферы

Вследствие сжигания твёрдого топлива образуются продукты горения, представляющие смесь воздуха и дымовых газов. Дымовые газы, в состав которых входят: соединения оксидов серы (SO_x), оксидов азота (NO_x), зола и др. – подвергаются очистке, так как загрязняют атмосферу.

Для снижения воздействия на атмосферу на большинстве угольных ТЭС устанавливаются электрофильтры. На мазутных и газовых ТЭС обычно используют очистку газов от серы.

Очистка дымовых газов осуществляется с помощью циклонов. С помощью центробежной силы поток воздуха раскручивается, после чего тяжелые частицы (пыль) выносятся на края устройства и оседают в пылесборнике.

4.3.2 Защита гидросферы

Доля энергетики в общем объеме потребления пресной воды промышленностью страны составляет около 70 %, из которых 90 % сбрасывается в поверхностные водоемы, в том числе 4 % загрязненных стоков.

В результате производственной и хозяйственно-бытовой деятельности электростанций образуются: промывочные и консервационные воды, регенерационные воды водоподготовительных установок (ВПУ) и др.

Сточные воды по своему составу разнообразны. Для очистки вод

применяются следующие методы: механические, химические, физико-химические и биологические.

Качественные и количественные показатели состояния поверхностных (степень загрязненности) и сточных вод следует контролировать с помощью надежной системы наблюдений, контроля и оценки [66].

Особое внимание следует уделить золоотвалам. Несмотря на то, что их прорыв не представляет угрозу для человека, данная ситуация может привести к уничтожению многих земельных участков и сбросу содержимого хранилища золошлаковых отходов (ЗШО) в водоёмы.

Поэтому заполнение ЗШО должно проводиться равномерно с отведением из него осветлённой воды в количестве и с качеством необходимым и достаточным для водоснабжения внутростанционной системы гидрозолоудаления (ГЗУ) ТЭС и обеспечивающие наличие свободной ёмкости ЗШО не менее чем на пятилетнее складирование золошлаковых отходов [67].

На Томской ГРЭС-2 используется замкнутая система охлаждения. Вода берется из реки Томи, после она очищается и подготавливается для производственного процесса в химическом цехе, затем возвращается обратно в бассейн. После бассейна вода снова подается в химический цех.

4.3.3 Защита литосферы

Отходы производства станции в литосферу – обтирочный материал; мусор от уборки помещений; шлак от котлов; хим. вещества от золы, которая осаждается после выброса в атмосферу.

Для сбора и вывоза отходов предусмотрены контейнеры и ёмкости на специально отведённых для них площадках. Шлак котлов с помощью жидкого шлакоудаления отправляется шлакоотвалы.

Земли золошлакоотвалов подвергаются рекультивации.

4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

По природе возникновения ЧС могут быть: техногенные, природные, биологические, экологические, социальные [68].

К возможным ЧС в КТЦ относятся: взрывы угольной пыли в дробилках (техногенная), неконтролируемый выброс токсичных жидкостей (техногенная), наводнение (природная), разрывы резервуаров с маслом (техногенная), угроза пандемии (биологическая).

С учетом специфики работы и наличием горючих веществ, взрывоопасного оборудования и электрических в КТЦ наиболее вероятно возникновение пожара, под которым понимается вышедший из-под контроля процесс горения, обусловленный возгоранием вследствие короткого замыкания или взрыва.

Пожарная безопасность характеризуется ФЗ №123 [69]. Котельный цех относится к категории Г – производства, связанные с обработкой негорючих веществ и материалов в горячем, раскаленном или расплавленном состояниях, а также производства, связанные со сжиганием твердого, жидкого и газообразного топлива.

В целях повышения пожарной безопасности на тепловых электростанциях запрещены кабели с полиэтиленовой изоляцией и оболочкой.

Основными причинами возможного возникновения возгорания и пожаров на ТЭС являются возгорание изоляции, кабелей, турбинного и трансформаторного масла, водорода.

Согласно [70, 71] предусмотрены следующие мероприятия по предотвращению пожаров и взрывов:

- 1) предотвращение образования горючей смеси "воздух-водород" обеспечиваем системой уплотнения вала генератора;
- 2) предотвращение утечки масла за счет плотности систем перекачки, емкостей хранения и контроля в процессе эксплуатации;
- 3) предотвращение образования в горячей среде источников замыкания за

счет выбора правильного оборудования по ПУЭ;

4) защита от короткого замыкания, за счет применения автоматов, плавких вставок, предохранителей и выбора наиболее эффективного сечения проводов.

При возникновении пожара, работник, увидевший пожар, должен заявить о происшествии в пожарную службу по телефонному номеру 01 или 112. В помещениях автоматически срабатывают датчики пожаротушения, и звуковая система оповещает всех работников о немедленной эвакуации, далее все направляются на выход в соответствии с планом эвакуации при пожарах и других ЧС.

Выводы по разделу

В разделе «социальная ответственность» рассмотрены возможные вредные и опасные производственные факторы. Для сохранения здоровья работников необходимо следить за выполнением требований установленных норм и правил на предприятии.

После был определён характер вредного воздействия проекта на окружающую среду, и предложены решения по его снижению.

Также выявлен наиболее вероятный вид ЧС, разработаны меры по предупреждению ее возникновения, а также порядок действия в результате возникновения ЧС и меры по ликвидации её последствий.

Томская ГРЭС-2 состоит в группе компаний «Интер РАО» и проходит проверку на соответствие условиям труда и соблюдение охраны труда, пожарной безопасности. Проверки проводятся с помощью внутренних, внешних аудитов, проверки ростехнадзора.

Таким образом, воздействие опасных и вредных производственных факторов сведено к минимуму.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Произведён аналитический обзор существующих методов очистки дымовых газов от золы. В результате анализа были рассмотрены: новые технологии по золоулавливанию, находящиеся на стадии научных испытаний, и преобразование уже эксплуатируемых аппаратов.

2. По ряду критериев, предложенных в таблице 4, было установлено, что наиболее перспективными (конкурентоспособными) технологиями являются эмульгаторы и рукавные фильтры (рисунок 21). Однако все из рассмотренных технологий имеют большой потенциал к усовершенствованию.

3. В ходе анализа работы системы золоулавливания Томской ГРЭС-2 установлено кол-во выбросов после ЗУ для каждой котельной установки. По отдельности ЗУ не превышают ПДВ (500 мг/м^3). Суммарные выбросы станции составляют 945 мг/м^3 , что обуславливается использованием каменного угля Кузнецкого месторождения, обладающим высокой приведённой зольностью ($A_{\text{пр}}=3,04 \text{ \%}\cdot\text{кг/МДж}$).

4. В рамках работы рассмотрены мероприятия по улучшению эффективности системы улавливания (малозатратные и многозатратные) (таблица 22), поскольку в ходе анализа была выявлена высокая фактическая скорость дымовых газов в горловине установленных скрубберов ($93,5 \text{ м}^3/\text{с}$).

5. После ряда улучшающих мероприятий, таких как: установка доп. скруббера Вентури (МС-4500); установка ЭФ типа ЭГА – выбросы золы снизились в 18 и 15 раз соответственно.

6. Предложены следующие решения по усовершенствованию системы очистки ДГ от золы: подключение доп. скруббера Вентури, установка циклонов в начале цепи ЗУ или переоборудование имеющихся скрубберы в кольцевые эмульгаторы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гальчук П.В., Макушова О.М. Применение альтернативных технологий для восполнения невозобновляемых исчерпаемых экономических ресурсов// VII Лужские научные чтения. Современное научное знание: теория и практика, 2019 год;
2. Показаникова К.А. Экологические проблемы энергетики// Молодёжь и научно-технический прогресс, 2017 год;
3. Севрук Д.А., Андралойть О.Ю. Экологические проблемы энергетики и пути их решения// 74-я конференция БНТУ, 2018 год;
4. Балашов А.А., Беляева Н.С., Чупрынина С.А., Шилова Т.В., Полякова Е.С., Истомина Т.А. Анализ энергопотребления в России и Германии// Научный альманах N 5-3(31), 2017 год;
5. Агеев В. Г., Гребёнкин С.С., Кравченко Е.В., Буряк Д.С. Эколого-экономические проблемы комплексного использования природных ресурсов и возможные пути их решения// Научный вестник НИИГД «Респиратор» № 1(55), 2018 год;
6. Ядутов В.В., Петров Т.И., Зацаринная Ю.Н. Воздействие ТЭС на окружающую среду // «Энергетика и рациональное природопользование», 2013 год;
7. Стратегия развития угольной промышленности РФ до 2035 года;
8. Энергетическая стратегия России до 2035 года;
9. Проскуракова Л.Н., Ермоленко Г.В., Возобновляемая энергетика 2030: глобальные вызовы и долгосрочные тенденции инновационного развития// Москва, 2017 год;
10. Плакиткин Ю. А. Угольная промышленность России на мировом рынке угля: тенденции перспективного развития // Уголь. – 2016. – № 7. – С. 12-16;
11. United Nations Conference On Trade And Development (UNCTAD);
12. Филимонов, Ф. Ю. Особенности мирового рынка угля и факторы, влияющие на его развитие // Инновационная экономика: материалы IV Междунар. науч. конф. – г. Казань: Бук, 2017 год;

13. Мога И.С. Место России на мировом рынке угля// «Государственный институт управления» г. Москва, 2018 год;
14. Грунь В.Д. Основные вехи в истории развития угольной промышленности России // «Горная Промышленность» №4 (134), 2017 год;
15. Салибгареева К.Б. Мировое производство электроэнергии// European Science №12(22), 2016 год;
16. Кавешников Н. Европейский союз: экономический рост без роста энергопотребления// Научно-аналитический вестник ИЕ РАН, №4, 2018 год;
17. Макаров И.А., Степанов И.А. Парижское соглашение по климату: Влияние на мировую энергетику и вызовы для России, 2017 год;
18. Исламов С.Р. Эффект бабочки: как начинаются наводнения // Наука и жизнь № 10, стр. 122-123, 2016 год;
19. Сорохтин, О.Г. Эволюция и прогноз изменений глобального климата Земли. Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований; НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 88 стр., 2016 год;
20. Симонов А. Солнце грозит ледником // Российская газета, № 64, 2018 год;
21. Исламов С.Р. Будущее угля: в поисках новой парадигмы// «Уголь», 2018 год;
22. Прогноз развития энергетики мира и России// Институт энергетических исследований РАН Центр энергетики Московской школы управления Сколково, г. Москва, 2019 год;
23. Череватский Д.Ю., Чекина В.Д. О связях между энергопотреблением и экономическим ростом: аналитический обзор// Институт экономики промышленности, 2017 год;
24. Ушаков В.Я. Основные проблемы энергетики и возможные способы их решения// Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет, 2017 год;
25. Борисенко А.В. Уголь – будущее энергетики// 2017 год;

26. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности (с Изменениями N 1, 2);
27. Пермякова Д.К. Влияние угольных ТЭС на экологию окружающей среды// Строительный факультет Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2019 год;
28. Никонова Р.А. Защита окружающей среды при эксплуатации ТЭС// Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, 2018 год;
29. Падалко И.Ю. Очистка воздушного бассейна от выбросов дымовых газов// Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018 год;
30. Горащенко А.В. Снижения загрязнения окружающей среды от выбросов ТЭС// Сборник статей Международной научно-практической конференции, г. Казань, 2019 год;
31. Костенко Т.А. Экологические проблемы теплоэнергетики// Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019 год;
32. Крылов Д.А. Экологическое воздействие угольных ТЭС на окружающую среду// Вестник ЗабГУ № 09 (124), 2018 год;
33. Потапов С.О. и др. Физико-химические свойства золы-уноса от сжигания Экибастузских углей// Институт металлургии УрО РАН, «Бутлеровские наследия», 2017 год;
34. Ежова Н.Н. и др. Современные методы очистки дымовых газов// Экология промышленного производства, 2020 год;
35. Жабалова Г.Г. и др. Комплексное снижение выбросов на ТЭЦ// Технические науки, 2017 год;
36. Шашкин В.Ю. и др. Исследование методов очистки дымовых газов КУ// Южно-Уральский государственный университет, 2018 год;
37. Ежов В.С. и др. Вредные выбросы теплоэнергетических предприятий в атмосферу и способ очистки дымовых газов теплогенераторов автономного

теплоснабжения// Юго-Западный государственный университет, г. Курск, 2017 год;

38. Дядин А.А. Современные методы очистки выбросов дымовых газов// СамГТУ, г. Самара, 2019 год;

39. Замалиева А.Т. Повышение энергетической и экологической эффективности систем газоочистки на ТЭС// Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, 2019 год;

40. Мантула В.Д. и др. Применение рукавных фильтров в газоочистках агрегатов известково-обжигового и доломитного производств// Экология и промышленность, 29-35 стр., 2017 год;

41. Новиков А.С. и др. Рукавные фильтры для очистки неорганизованных выбросов литейного двора доменного цеха// Metallurgiya XXI столетия глазами молодых, 2018 год;

42. Лебедев В.М. Основные проблемы в развитии региональной теплоэнергетики в сибирских условиях и пути их решения// Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, 2018 год;

43. Костенко Т.А. Экологические проблемы энергетики// Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, 2019 год;

44. Prienov S.I. A new method for calculating the efficiency of dust collection in Venturi scrubbers. Industrial Heat Engineering// vol. 33, no. 1. pp. 82–87. In Ukr., 2017 year;

45. Anichkov S.N., Giniyatullin S.N., Zykov A.M. Improving the efficiency of fly ash capture in wet ash traps// Electric stations vol. 8, pp. 59–62. In Rus., 2019 year;

46. Ran W., Saylor J.R. A mechanistic explanation of the increase in particle scavenging in the ultrasonic scrubber// Journal of Aerosol Science// vol. 87, pp. 88–101, 2018 year;

47. Dorovskikh R.S., Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golikh R.N., Shalunova K.V., Nesterov V.A., Shalunova A.V., Abramov A.D. Improving the efficiency of

the process of coagulation of submicron particles by high-intensity ultrasonic vibrations// Bulletin of Altay Science, Iss. 1, pp. 298–307, 2018 year;

48. Хмелев В.Н. и др. Ультразвуковая коагуляцию в скрубберах Вентури: особенности реализации и эффективность применения// Алтайский государственный технический университет, 2020 год.

49. Титов А.Г. и др. Расчёт гидродинамики потока в электроциклоне// Уральский федеральный университет, 2018 год;

50. Жабалова Г.Г. и др. Комплексное снижение вредных выбросов на ТЭЦ// Карагандинский государственный индустриальный университет, 2017 год;

51. Титов А.Г., Гильванова З.Л., Новиков К.Л., Инюшкин Н.В., Ермаков С.А., Парамонов Д.А. Исследование процесса улавливания летучей золы в экспериментальной модели электроциклона// ФГАОУ ВПО УрФУ им. Б.Н. Ельцина, 2017 год;

52. Экология энергетики: учебное пособие / по ред. В.Я. Путилова. –М.: Изд-во МЭИ, 2003 год – 715 с;

53. Тепловой расчёт котлов (Нормативный метод). – издание 3-е, перераб. и дополн. – С.-Пб.: НПО ЦКТИ, 1998 год. – 256 с.: ил.;

54. Нормативы удельных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок// Минобрнауки России №14.U02.21.0665 от 17 августа 2012 год;

55. Гаврикова Н.А. и др. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение// Издательство Томского Политехнического университета, 2014 год;

56. Трудовой кодекс РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021);

57. ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя;

58. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»;

59. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности»;

60. МУ «Расчет искусственного освещения», ТПУ;

61. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение». Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*»;
62. СН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация...»;
63. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. «Вибрационная болезнь. Общие требования»;
64. ГОСТ 12.1.038-82. «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов»;
65. Экология энергетики: учебное пособие / по ред. В.Я. Путилова. –М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 715 с;
66. ГОСТ 17.1.3.13-86 Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнения;
67. СТО 70238424.13.030.10.001-2008 «ТЭС. Экологическая безопасность ЗШО»;
68. ГОСТ Р 22.0.01-2020 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях»;
69. Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 N 123-ФЗ;
70. ГОСТ 12.1.004-90 ССБТ «Организация обучения безопасности труда»;
71. ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ «Взрывобезопасность».

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А – Усреднённая зависимость степени проскока Е от параметра золоуловителя П)

П	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
0,	1,0000	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,4966	0,4493	0,406
1,	0,3679	0,3329	0,3012	0,2725	0,2466	0,2232	0,2019	0,1827	0,1653	0,149
2,	0,1353	0,1225	0,1100	0,1003	0,0907	0,0821	0,0743	0,0672	0,0608	0,055
3,	0,0498	0,0450	0,0407	0,0369	0,0334	0,0302	0,0273	0,0247	0,0224	0,020
4,	0,0183	0,0166	0,0150	0,0136	0,0123	0,0111	0,0100	0,0091	0,0082	0,007
5,	0,0067	0,0061	0,0052	0,0050	0,0045	0,0041	0,0037	0,0033	0,0030	0,0027
6,	0,0025	0,0022	0,0020	0,0018	0,0017	0,0015	0,0014	0,0012	0,0011	0,0010
7,	0,0009	0,0008	0,0007	0,0007	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004
8,	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001
9,	0,00012	0,00011	0,00010	0,00009	0,00008	0,00007	0,00007	0,00006	0,00005	0,0000

(Приложение Б)

Overview of flue gas cleaning methods

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ91	Бурцев Всеволод Валерьевич		

Руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Директор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Матвеев Александр Сергеевич	к.т.н., доцент		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Миронова Вероника Евгеньевна	к.ф.н.		

Introduction

If we believe the forecasts of the energy strategy of Russia (until 2035), it is expected to increase the burden on the environment, due to an increase in the level of production and consumption of primary energy (heat and electricity). Therefore, the state is focusing on sustainable energy development which includes: social responsibility, environmental safety and innovative development of enterprises. The environmental constituent of the policy also determines Russia's accession to the Paris Agreement in 2019. One of the expected results of the considered policy is to ensure that the level of greenhouse gas emissions by 2035 does not exceed 120% of the level of 2010 [1].

The main environmental obstacles of the industry are: the worsening of modern technologies in reducing environmental damage of production (lack of incentives for innovation and widespread implementation of developments), the lack of waste-free production and the existence of outdated forms of natural legislation. Therefore, it is inevitable to implement international environmental legislation, upgrade existing equipment that is responsible for the cleanliness of the environment.

Since the main focus of this work is on thermal energy, we firstly need to understand the nature of thermal power plant (TPP) emissions.

Thermal power plant (TPP) emissions and their cleaning methods

Many energy facilities run on hydrocarbon fuel, the waste from which pollutes the environment. Hydrocarbon fuels include: gasoline, kerosene, coal, diesel fuel, and fuel oil. One of the largest sources of emissions is the thermal power plant where the share of pollution is about 15 % of all industrial emissions.

A significant amount of air pollution is associated with the emissions of flue gases generated by the combustion of organic fuel in the boilers of power plants [2].

The flue gases contain fly ash, the tiniest particles of unburned fuel, nitrogen oxides, sulfur gases, etc. causing serious damage to the environment.

Also, under the influence of ash and unburned fuel particles, the heating surfaces of boilers, flues and smoke pumps are worn away. An increase in the concentration of sulfur dioxide in the air in combination with atmospheric precipitation accelerates the corrosion of metal structures in industrial and residential buildings [3].

In the chemical composition of the inorganic substance of coal, two groups of elements are distinguished. The first group is the main ash-forming elements: Si, Al, Ca, Mg, Na, K, S, P – almost the entire mass of the inorganic component of coals is accounted for by these substances. The second group consists of trace elements that make up 1% of the total inorganic matter of coal. In accordance with the geochemical classification, concentrated trace elements include: small elements 0,1...0,001 % (1000...10 g/t), rare elements – 0,001...0,00001 % (10...0,1 g / t) and extremely rare elements with a content of less than 0.00001% (less than 0,1 g/t) (Table A) [6].

Table A – Classification of trace elements in coals

Micro element groups	Dry Substance content interval, g/t	Average composition of micro element groups in coal
Micro	1000...10	B, F, Cl, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Zr, Ba, Pb
Rare	10...0,1	Li, Be, Sc, Co, Ga, Ge, Se, Sr, Br, Y, Nb, Mo, Cd, Sn, Sb, Zn, Cs, La, Yb, W, Bi, U, Hg
Ultra rare	Less than 0,1	Ag, Re, Au, Pt

When burning fuel (coal, fuel oil, etc.), carbon compounds ($\text{CO}+\text{CO}_2$), water vapor H_2O , sulfur oxides (SO_2+SO_3) and nitrogen oxides (NO_x), ash, soot (and the impurities contained in it) are released into the atmosphere.

Nitrogen oxides NO_x and sulfur (SO_2+SO_3), which affect the respiratory system and blood composition (decrease in hemoglobin levels), are the most dangerous for the human body. A low level of concentration of these substances leads to irritation of the eyes, nose and other mucous membranes, with prolonged exposure-to respiratory arrest; a high concentration – to burns and pulmonary edema. However, nitrogen and sulfur oxides are combined with dust, soot and other impurities, which makes it difficult to assess their exact level of harm to humans. Sulfur oxides account for up to 50% of all emissions, while nitrogen oxides account for 40%. Along with carbon dioxide, sulfur and nitrogen oxides are the most dangerous substances for nature and humans [5].

They distinguish local and global emissions. Local emissions of thermal power plants – pollution that spreads over an area with a diameter of 15 to 50 km. Global emissions take into account the overall negative impact on the environment (while taking into account the emissions of other nearby enterprises).

If, as an example, we consider a thermal power plant (TPP) with a capacity of about 2,5 million kW, we can see that with the consumption of 20 thousand tons of coal per day, the emissions of sulfur oxides are 34 times higher than the mass of fuel, nitrogen oxides-10 times, and ash, dust and soot combined-8-10 times during the operation of cleaning devices.

Sanitary legislation of the Russian Federation established a threshold limit value (TLV) of pollutants in air and water bodies (Table B).

Two parameters of TLV have been established for harmful substances: short-term exposure limit (STEL), determined in the trials of 20 min, and daily average (DA) – the average 24 h TLV is defined at the level of human inhalation.

Table B – TLV values

Substance	STEL, mg/m ³	DA, mg/m ³	Hazard Class
NO ₂	0,085	0,04	2
NO	0,6	0,06	3
SO ₂	0,5	0,05	3
C ₂₀ H ₁₆	–	0,1 mkg/ 100 m ³	1
V ₂ O ₅	–	0,002	1
Soot	0,15	0,05	3
CO	5	3	4
NH ₃	0,2	0,04	4
H ₂ S	0,008	–	2
Inorganic dust containing silicon dioxide, %	0,15	0,05	3
>70			
20-70	0,3	0,1	3
<20	0,5	0,15	3
TPP coal ash*	0,05	0,02	2

None of the powerful thermal power plants purifies flue gases from sulfur and nitrogen oxides [4]. Consequently, the fight for the environment cleanliness and the sanitary conditions of industrial cities and working villages is an important problem.

There are many ways to solve this problem. The country has a large selection of patented and design developments to reduce emissions of harmful substances.

For the most effective cleaning of air from combustion products, various methods should be combined, since there are no universal devices that can catch all types of pollutants.

For example, for cleaning flue gas streams from ash and other types of solid particles, a good solution is a *tubular cloth filter* – these are cylindrical containers with vertically arranged suspended fabric bags. This device works on the principle of filtering.

Cloth filters are used to capture dry dust contained in flue gases. The flue gases pass through a flexible cloth that consists of fine fibers from 100 to 300 microns. For filtration, you can use cotton, wool, synthetic and fiberglass cloth.

Cloth must meet the following requirements: it is necessary to keep the required amount of dust on the surface; have high mechanical strength, low cost; withstand certain temperatures. It is interesting to consider the schematic diagram

of the operation of tubular cloth filters (Figure A). Flue gases pass through tubular filters where dust is deposited in the pores. Removal of ash or dust from the surface of the cloth is carried out by shaking or blowing air under pressure in the opposite direction. Dust accumulates in the lower part of the filter- fly-ash hopper. The filtration rate is 0.5-2 cm/s, because of secondary entrainment of dust particles it occurs at high speeds. Also, cloth filters have a large hydraulic resistance, around 0,5-1,5 kPa. The main use of tubular cloth filters is the ability to withstand high temperatures. At a flue gas temperature of up to 130 °C, woolen cloth are used, and at a temperature of about 200 °C it is fiberglass or fiberglass with graphite. The minimum temperature of the gases should be 15-30 °C above the dew point temperature. The duration of the tissue depends on the growth of resistance, formed due to the bonding of individual pores. On average, the duration of the cloth is 1-3 years. The diameter of the sleeves is 127-300 mm, the length reaches 10 m. Wet gas cannot be cleaned in cloth filters, as it contributes to the bonding of the cloth pores and reduces the cleaning efficiency. The ash concentration at the outlet is 35-50 mg /m³ [8].

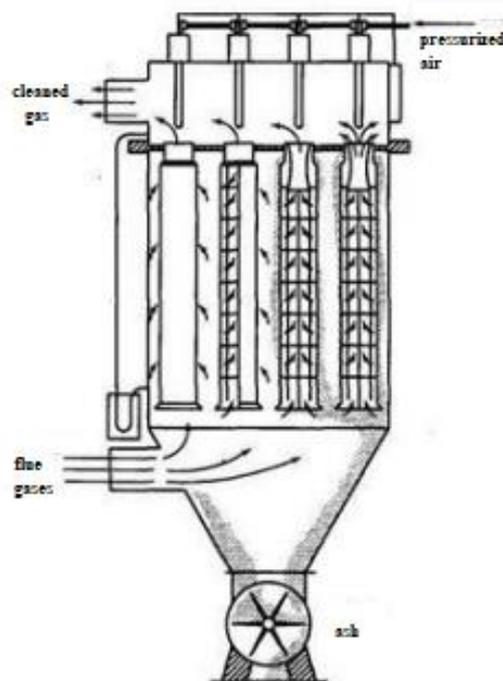


Figure A – The schematic diagram of the operation of tubular cloth filters

Electrostatic filters – are devices where the flow of polluted air passes through an electric field and dust particles settle on the electrodes under the action of an electrostatic field of reverse polarity [7].

Electrofilters are able to capture particles less than 10 microns in size and operate at temperatures up to 400-450 °C. Electrofilters are sensitive to minor changes in the set operating mode and mechanical damage. The electrofilter consists of a body in which the electrodes are located. The electrodes are divided into: corona-forming and precipitation. The corona-forming electrodes are smooth or needle-shaped rods, while the precipitation electrodes are plates. The crude gas passes between the corona-forming and precipitation electrodes. A voltage is applied to the corona-forming electrode, around which an electric field is created. In the region of the electric field, active ionization of the gas occurs, that is, the free electrons acquire high velocity. When electrons collide with neutral gas atoms, the electron can knock the neutral atom out of the electron shell and get the positive charge of the ion, or get on the electron shell of the atom and get, respectively, the negative charge of the ion. The ash particles passing between the two electrodes acquire an electric charge. Under the action of an electric field, the main part of the particles is deposited on the surface of the precipitation electrode. To clean the surface of the electrodes, a shaking mechanism is used. The supply of electricity to the corona-forming electrode is carried out by a power supply device, which consists of a voltage regulator, a step-up transformer and a rectifier. The degree of flue gas purification depends on the flow rate and the particle drift rate. The lower the flow rate, the higher the degree of purification. Drift velocity – the speed at which charged particles move towards the electrode. The higher the drift rate, the higher the cleaning rate. On average, the gas velocity is 1,6-1,9 m/s. The ash concentration at the outlet of the electrofilter is 30-50 mg/m³. The gas purification coefficient is 99-99,8 %. The cost of electricity is 0,1-0,5 kWh per 103 m³ of flue gas. The main disadvantage is the high metal consumption and large overall dimensions [8].

Electrocyclones – are devices for removing solid and liquid particles from a gas stream, which precipitates aerosol particles under the combined action of Coulomb and centrifugal forces on them [12].

The electrocyclone has a high trapping efficiency (99.9%) at inlet speeds up to 15-17 m/s. The trapping efficiency at an increased inlet speed of 24 m/s can reach values of 99.5% when installing profiled elements on the precipitation electrode. Dust loss when installing profiled elements on the precipitation electrode is reduced by 4 times [13].

Figure B shows a diagram of an electrocyclone.

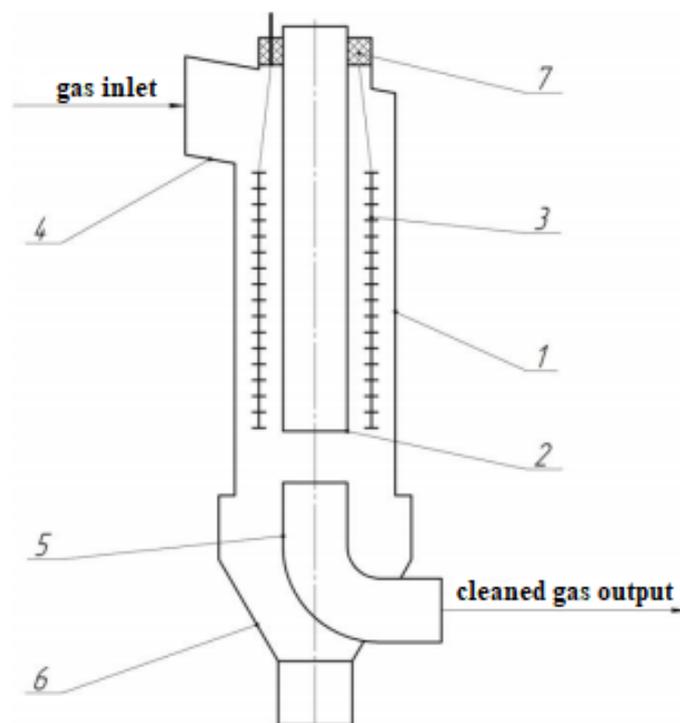


Figure B – The diagram of an electrocyclone, where:

1 – body, 2 – central pipe, 3 – corona-forming system, 4 – inlet pipe, 5 – exhaust pipe, 6 – bunker, 7 – insulator.

One of the most important factors affecting the ash deposition process is the speed of the gas flow and the length of the core of the electrocyclone (the area where cleaning is performed). They determine the turbulence of the gas, and the residence time of the aerosol in the core of the device, and therefore the amount of electric charge received by the suspended particles.

At the same time, it is necessary to note some disadvantages inherent in electric cyclones. In these electrocyclones, only substances in the suspended state, i.e. in the form of dust or fog, can be deposited, but in an electrocyclone, one type of gas cannot be separated from another or separated from the steam without first condensing it, without using a chemical reaction. Not all products can be effectively captured in electrocyclones due to their physicochemical properties. Such products include soot, zinc oxide sublimate, and flue gas ash.

The researchers [14] found that efficiency of gas cleaning increases with the height of the core, since the gas residence time in the core increases; with an increase in the gas velocity at the entrance to the apparatus, the efficiency of gas cleaning decreases due to a decrease in the residence time and an increase in the breakdown of the deposited ash from the surface of the precipitation electrode.

Ring emulsifiers are devices that are vertical containers with a rotating dish-shaped nozzle. The principle of operation is based on the wet emulsifying method, the essence of which is the formation of an emulsion formed from swirling flows, from polluted gas (flowing at the bottom of the container at an angle) and liquid. This emulsion accumulates in a certain place (under the housing plate), and after turning off the device, the sludge is removed through the opening of the working chamber, and the gas exits through the chimney.

Scrubbers have a similar structure to ring emulsifiers, but they have their own characteristics. The contaminated gases enter the device and are cleaned with water, during which the dirt remains under water, and the purified gas is released into the atmosphere through a nozzle in the upper part of the housing.

Despite the high quality of cleaning, the efficiency of the Venturi scrubbers used in some cases does not meet the current environmental requirements for the level of emissions of harmful particles into the atmosphere. This mainly depends on the physical effects implemented in wet cleaning devices, and also on the degree of entrainment of highly dispersed particles by the gas stream. Studies [17-18] have shown that the improvement of the wet cleaning process in order to increase the efficiency of solid particles coagulation (in fact, to increase the

probability of their collision with the drops of the irrigated liquid) is achieved by optimizing the operating or design parameters of Venturi scrubbers.

Unfortunately, this approach to improvement does not allow increasing the efficiency of capturing particles smaller than 1-2 microns.

Ultrasonic coagulation in a high-intensity acoustic field is one of the promising approaches that does not cause changes in the technological modes of operation of gas cleaning equipment and can be used to increase the efficiency of capturing highly dispersed particles by liquid droplets [19-20]. Ultrasonic coagulation is the process of approaching and combining suspended solid particles in a gas stream by means of additional collision. It is due to the fact that the solid particles are given an additional oscillatory oncoming motion. Ultimately, this leads to their enlargement and more efficient deposition. The optimality criterion of this technology is the maximum efficiency of ash particle coagulation in the Venturi pipe and the maximum degree of flue gas purification [21].

Figure C shows a Venturi pipe scrubber.

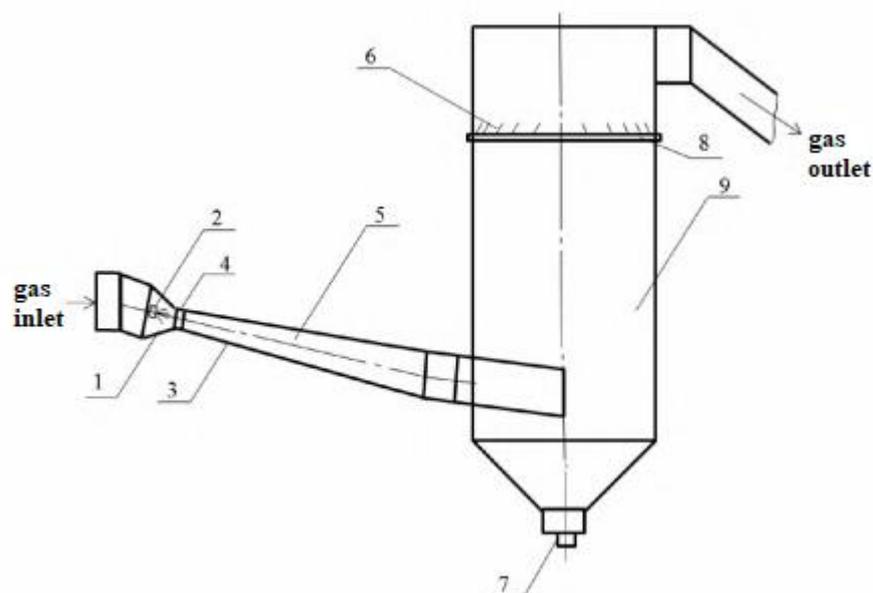


Figure C – Venturi scrubber, where:

1 – confuser; 2 – irrigation device; 3 – diffuser; 4 – nozzle throat; 5 – Venturi pipe; 6 – irrigation nozzle; 7 – hydraulic seal; 8 – distribution ring; 9 – drip tube.

Three methods are used for cleaning flue gases from sulfur oxides: *wet, wet-dry and dry cleaning*. Each is based on the sorption principle.

Wet removal of sulfur is used when the content of the corresponding component in the fuel is high (up to 5 %). Cleaning can take place with an efficiency of 95 to 99%, depending on the absorbent material used. This method is usually used in a scrubber

The dry analog of desulfurization is based on the use of dry limestone introduced into the furnace of the device. Preventing the ingress of sulfur into the flue gases is carried out by calcining lime. This method also provides an efficiency of up to 99%.

The advantage of using semi-dry limestone direct-flow desulphurization technology is the absence of waste water which improves the environmental performance of the process. However, there is also a drawback – an increase in the cost of the reagent-lime [16].

When using the wet-dry method of removing sulfur oxides, lime is used, which binds sulfur oxides, and an absorbent that evaporates water. As a result, calcium sulfides and sulfates are formed, which are subsequently removed using an electrostatic or bag filter. This method can achieve up to 98% cleaning efficiency.

The authors [15] believe that the use of wet methods for cleaning sulfur oxides works better than semi-dry (20-30% better) and dry systems (40-45% better). But the combination of wet-dry technology (with high-quality lime) also shows good results [16].

At thermal power plants, the following methods are usually used: wet and wet-dry methods using limestone [2].

Two main technologies are used to purify flue gases from nitrogen oxides: selective catalytic reduction of NO_x and selective non-catalytic reduction of NO_x . Both technologies are based on the NO_x reduction reaction using ammonia or its derivatives to form nitrogen and water [7].

Popular ways to control harmful emissions from centralized and autonomous sources of thermal energy and industrial enterprises in the CIS and

abroad come down to reducing the formation of toxic substances during fuel combustion (maintaining an optimal excess of air, non-stoichiometric combustion, flue gas recirculation, reducing preheating of air, water or steam injection, fluidized bed combustion, etc.) and subsequent partial capture of undesirable components in the outgoing gases (catalytic and non-catalytic reduction and oxidation, absorption, adsorption, electron beam and ozone methods, etc.) [9-11].

Conclusion

From the listed scientific works, it can be concluded that there are many effective methods of cleaning flue gases, which together can reduce the environmental deterioration caused by thermal power plants.

Attracting investments by improving existing cleaning technologies and their further implementation will increase the quality of power plants in general (using cheap fuel, obtaining raw materials from production waste).

References

1. Russia's Energy Strategy for the period up to 2035;
2. "the protection of the environment during the operation of the thermal power plant", Nikonova, R. A., 2018;
3. "the Clean air emissions from flue gas", Padalko I. Yu., 2018;
4. "Reduction of environmental pollution from emissions of thermal power plant", Gorashchenko A.V., 2019;
5. "Ecological problems of power engineering", Kostenko, T. A., 2019;
6. "the Environmental impact of coal-fired power plants on the environment", Krylov D. A., 2018;
7. "Modern methods of purification of flue gases", the Uncle A. A., 2019.;
8. "Research of methods of cleaning of flue gases KU R-16/1, 4-50-700", Shashkin V. Yu., 2020;
9. Application of thermoelectricity for power supply of an individual heating point of a heating system of an apartment building. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Brezhnev A.V., Drozhzhin R. S. In the collection: Science of the Young – the Future of Russia: Collection of scientific articles of the international scientific conference of promising developments of young scientists: in 3 volumes. Southwestern State University. 2016. pp. 325-329;
10. Investigation of boiler flue gas purification from nitrogen oxides during natural gas combustion. Kormilitsyn V. I., Yezhov V. S. Teploenergetika. 2013. No. 2. p. 71;
11. "the Harmful emissions of thermal power enterprises in the atmosphere and method of flue gas heat Autonomous heating" Ezhov, V. S., 2019;
12. "the calculation of the hydrodynamics of the flow in the flux vortex", Titov A. G., etc., Ural Federal University, 2014;
13. "a Comprehensive reduction of harmful emissions from CHP," Gabulova G. G., et al., Karaganda state industrial University, 2017;
14. "a Study of the trapping of fly ash in experimental models of flux vortex", Titov A. G., Gilfanov Z. L., Novikov K. L., N. Inyushkin.In., Ermakov S. A.,

Paramonov, D. A., FGAOU VPO Ural Federal University named after. B. N. Yeltsin, 2011;

15. Volchyn, I. A. "the technology of dry and semi-dry flue gas desulfurization coal-fired power plants" / Volchyn I. A., A. A. Yasinetskiy // Energetika ta elektrifikatsiya. – 2012. – No. 5. - p. 7-20;

16. "Analysis of the processes of purification of TPP flue gases from sulfur dioxide using the semi-dry limestone method", Vysotsky S. P., Donetsk National Technical University, 2019.;

17. Prienov S.I. A new method for calculating the efficiency of dust collection in Venturi scrubbers. Industrial Heat Engineering, 2011, vol. 33, no. 1. pp. 82–87. In Ukr.;

18. Anichkov S.N., Giniyatullin S.N., Zykov A.M. Improving the efficiency of fly ash capture in wet ash traps. Electric stations, 2009, vol. 8, pp. 59–62. In Rus.;

19. Ran W., Saylor J.R. A mechanistic explanation of the increase in particle scavenging in the ultrasonic scrubber. Journal of Aerosol Science, 2015, vol. 87, pp. 88–101.;

20. Dorovskikh R.S., Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golikh R.N., Shalunova K.V., Nesterov V.A., Shalunova A.V., Abramov A.D. Povyshenye effektivnosti protsessa koagulyatsii submikronnykh chastits ultrazvukovymi kolebaniyami vysokoy intensivnosti [Improving the efficiency of the process of coagulation of submicron particles by high-intensity ultrasonic vibrations]. Bulletin of Altay Science, 2015, Iss. 1, pp. 298–307.;

21. "Ultrasonic coagulation in Venturi scrubbers: features of implementation and efficiency of application", V. N. Khmelev et al., Altai State Technical University, 2020.