

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт – Энергетический
Направление подготовки – Энергетическое машиностроение
Кафедра – Парогенераторостроения и парогенераторных установок

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Модернизация котельной установки с котлом БКЗ-210-140 с целью улучшения экологических характеристик

УДК 621.181.2-048.35

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5BM4A	Мордвин Дмитрий Валерьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ПГС и ПГУ	Буваков Константин Владимирович	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры МЕН	Попова Светлана Николаевна	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель кафедры ЭБЖ	Романцов Игорь Иванович	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПГС и ПГУ	Заворин Александр Сергеевич	Д.Т.Н., профессор		

Томск – 2016 г.

Планируемые результаты обучения по ООП 13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Универсальные компетенции		
P1	Способность и готовность самостоятельно учиться и развивать свой общекультурный и интеллектуальный уровень, изменять свой научный и научно-производственный профиль в течение всего периода профессиональной деятельности с учетом изменения социокультурных и социальных условий, вести педагогическую работу в области профессиональной деятельности	Требования ФГОС ВО (ОК-1,3; ПК-11), Критерий 5 АИОР (п. 2.6.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Способность проявлять и использовать на практике навыки и умения организации работ по решению инновационных инженерных задач в качестве члена или руководителя группы, нести ответственность, в том числе в ситуациях риска, за работу коллектива с применением правовых и этических норм при оценке и самооценке профессиональной деятельности, при разработке и осуществлении социально значимых проектов, проблемных инженерных задач	Требования ФГОС ВО (ОК-2; ОПК-1; ПК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.3., п. 2.4., п. 2.5.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Способность и готовность приобретать и применять новые знания и умения с использованием методологических основ научного познания и библиографической работы с привлечением современных технологий, понимать роль информации в развитии науки, анализировать её естественнонаучную сущность, синтезировать и творчески применять при решении инновационных профессиональных задач	Требования ФГОС ВО (ОК-1,3; ПК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
P4	Способность и готовность проявлять в инновационной деятельности глубокие естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте	Требования ФГОС ВО (ОК-1; ОПК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.1.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Способность осуществлять коммуникации в профессиональной сфере и в обществе в целом, принимать нестандартные решения с использованием новых идей, разрабатывать, оформлять, представлять и докладывать результаты инновационной инженерной деятельности, в том числе на иностранном языке	Требования ФГОС ВО (ОК-2,3;ОПК-2,3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Профессиональные компетенции		
P6	Способность и готовность выполнять инженерные проекты с использованием современных технологий проектирования для разработки конкурентно способных энергетических установок с использованием знаний теоретических основ рабочих процессов в энергетических машинах и аппаратах	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-1,2,3), Критерий 5 АИОР (п. 1.3.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Способность и готовность ставить и решать инновационные задачи инженерного профиля, анализировать, искать и вырабатывать компромиссные решения с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний в условиях неопределенности, использовать методы решения задач оптимизации параметров в различных сложных системах	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-1,2,5), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Р8	Способность и готовность проводить инновационные инженерные исследования, технические испытания и (или) сложные эксперименты, формулировать выводы в условиях неоднозначности с применением глубоких теоретических и экспериментальных методов исследований, современных достижений науки и передовых технологий, строить и использовать модели с применением системного подхода для описания и прогнозирования различных явлений, осуществлять их качественный и количественный анализ, описывать результаты выполненной работы, составлять практические рекомендации по их использованию	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-4,5,6), Критерий 5 АИОР (п. 1.4, п. 1.6.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р9	Способность и готовность оценивать техническое состояние объектов профессиональной деятельности, с применением современного оборудования и приборов, анализировать и разрабатывать рекомендации по их надежной и безопасной эксплуатации, понимать проблемы научно-технического развития сырьевой базы, современных технологий по утилизации отходов в энергетическом машиностроении и теплоэнергетике и научно-техническую политику в этой области	Требования ФГОС ВО (ОПК-1; ПК-7,8,9), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р10	Способность и готовность к эффективному участию в программах освоения новой продукции и технологий, использованию элементов экономического анализа в практической деятельности на предприятиях и в организациях, готовность следовать их корпоративной культуре	Требования ФГОС ВО (ПК-9,10), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, п. 2.1.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки 13.04.03 Энергетическое машиностроение

Кафедра Парогенераторостроения и парогенераторных установок

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) _____ (Дата) Заворин А.С.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5ВМ4А	Мордвину Дмитрию Валерьевичу

Тема работы:

**МОДЕРНИЗАЦИЯ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С КОТЛОМ БКЗ-210-140 С ЦЕЛЬЮ
УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№ 2669/с от 06.04.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:

01.06.2016

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

1. Объект модернизации – котельная установка с паровым котлом БКЗ-210-140.
2. Технологии модернизации в условиях Владивостокской ТЭЦ-2.
3. Применение сорбентных технологий очистки дымовых газов от токсичных составляющих.
4. В качестве сорбента для очистки дымовых газов использовать цеолит.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов

(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение

1. Введение. Актуальность газоочистки на ТЭС с точки зрения современных экологических требований.
2. Пути снижения выхода токсичных газообразных веществ с дымовыми газами энергетических котлов. Сорбционные методы очистки дымовых газов, применяемые в энергетике.
3. Обоснование актуальности работы, постановка цели и задач. Описание объекта и предмета исследования, научная и практическая новизна, значимость результатов ВКР, реализация и апробация работы.
4. Выбор и описание технологий и средств модернизации котельной установки с котлом БКЗ-210-140 Владивостокской ТЭЦ-2.
5. Характеристика и свойства сорбента. Определение технологических параметров очистки дымовых газов с использованием цеолита в качестве сорбента.

результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).	6. Проведение технических расчетов, в том числе аэродинамического расчёта газового тракта котла БКЗ-210-140 и валовых выбросов вредных веществ. 7. Анализ полученных результатов и разработка технических решений по улучшению экологических характеристик работы котла БКЗ-210-140 Владивостокской ТЭЦ-2 за счёт реализации системы сорбентной очистки дымовых газов от токсичных составляющих. 8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. (Экономические расчеты по затратам на модернизацию. Техно-экономические показатели). 9. Социальная ответственность. 10. Заключение, в том числе на иностранном языке.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	1. Сборочные чертежи или схемы модернизированных элементов или систем – 1–2 листа на форматах А1.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	доцент кафедры МЕН, Попова Светлана Николаевна
Социальная ответственность	старший преподаватель кафедры ЭБЖ, Романцов Игорь Иванович
Иностранная часть	консультант-лингвист кафедры ИМОЯК, Муратова Елена Николаевна

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Основные разделы ВКР должны быть написаны на русском языке. Один раздел необходимо выполнить на иностранном языке, объем раздела должен составлять не менее 20 % от объема магистерской диссертации. Заключение переводится на иностранный язык.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	14.03.16
--	----------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ПГС и ПГУ	Буваков Константин Владимирович	к.т.н.		14.03.16

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4А	Мордвин Дмитрий Валерьевич		14.03.16

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5BM4A	Мордвин Дмитрий Валерьевич

Институт	Энергетический	Кафедра	Парогенераторостроения и парогенераторных установок
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Энергетическое машиностроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования и области его применения	<i>Объектом исследования является котельная установка с паровым котлом, установленные на теплоэлектростанции.</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования: - Электробезопасность; - Производственный шум; - Естественное и искусственное освещение; - Движущиеся части производственного оборудования; - Термическое воздействие.	<i>Основными вредными факторами при работе в рассматриваемой рабочей зоне являются факторы, связанные с электрическим током, подвижными частями оборудования, уровнем шума, освещением и высокой температурой оборудования. Необходимо предложить мероприятия по уменьшению воздействия вредных факторов и привести возможные средства защиты.</i>
2. Экологическая безопасность: Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду: - Расчет выбросов оксидов азота.	<i>Рассматриваемый котельный агрегат оказывает воздействие на окружающую среду. Основным являются производимые выбросы в атмосферу. Рассчитать значения основных выбросов.</i>
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.	<i>Наиболее возможными ЧС в рассматриваемой рабочей зоне является возникновение пожара. Для их предупреждения необходимо строгое соблюдение правил пожарной безопасности и норм, определяющих порядок работы с оборудованием. Рассмотреть средства, определяющие действия при возникновении ЧС и их ликвидации.</i>
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: Специальные (характерные для рабочей зоны рабочего персонала) правовые нормы трудового законодательства.	<i>Определить порядок и организацию работы в рассматриваемом помещении, обеспечивающие безопасные и комфортные условия труда, с соблюдением санитарных и технологических норм.</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романцов Игорь Иванович	к.т.н., доцент каф. ЭБЖ		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5BM4A	Мордвин Дмитрий Валерьевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5BM4A	Мордвин Дмитрий Валерьевич

Институт	Энергетический	Кафедра	ПГС и ПГУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Энергетическое машиностроение

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	—
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	—
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	—

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	—
2. Разработка устава научно-технического проекта	—
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	—
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	—

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Таблица 6.1 – Данные по стоимости металла

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры МЕН	Попова Светлана Николаевна	к.э.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5BM4A	Мордвин Дмитрий Валерьевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа (магистерская диссертация) содержит 131 с., 7 рисунков, 4 таблиц, 89 источников литературы, 1 приложение, 3 листа графической части.

Ключевые слова: паровой котел, котельная установка, очистка дымовых газов, адсорбция, сорбент, оксиды азота.

Объектом исследования являются котельная установка с котлом БКЗ-210-140 Владивостокской ТЭЦ-2, работающего на газообразном топливе, и устройство, предназначенное для сорбентной очистки дымовых газов от токсичных составляющих. Суть модернизации котельной установки заключается в том, чтобы снизить до норм предельно-допустимой концентрации выбросы оксидов азота за счёт реализации системы сорбентной очистки дымовых газов.

Цель работы – разработка малозатратной технологии сокращения токсичных техногенных отходов из потока газовой среды паровых котлов Владивостокской ТЭЦ-2 с целью улучшения их экологических характеристик.

В процессе работы проводились: анализ эффективности существующих методов очистки дымовых газов от оксидов азота, описание основ сорбционных технологий в газовых средах и свойств сорбентов, анализ состояния основного оборудования котельного цеха Владивостокской ТЭЦ-2, аэродинамический расчет котельной установки с устройством сорбентной очистки дымовых газов, расчет валовых выбросов вредных газообразных веществ.

Область применения: результаты работы могут служить основанием для внедрения устройства сорбентной очистки дымовых газов паровых котлов на Владивостокской ТЭЦ-2.

Экономическая эффективность проекта представлена в виде анализа конкурентоспособности технических решений, определения капитальных вложений на этапе сооружения очистного устройства годовых эксплуатационных издержек.

Определения, обозначения, сокращения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

теплоэлектроцентраль (ТЭЦ): Разновидность тепловой электростанции, которая не только производит электроэнергию, но и является источником тепловой энергии (в виде пара и горячей воды).

паровой котел: Устройство, в котором для получения пара требуемых параметров используется тепло, образующееся при сжигании органического топлива.

котельная установка: Совокупность устройств и механизмов для получения водяного пара или горячей воды за счет теплоты сжигаемого топлива.

сорбент: Твердое тело или жидкость, избирательно поглощающие (сорбирующие) из окружающей среды газы, пары и растворенные вещества.

адсорбция: Процесс поглощения газов, паров, веществ из раствора или газовой смеси поверхностным слоем жидкости или твердого тела – адсорбентом.

адсорбент: Материал, для которого характерен процесс поглощения, или «связывания», адсорбата (газы или жидкости) путем физической поверхностной адсорбции.

В данной работе применены следующие сокращения:

ТЭС – тепловая электростанция;

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;

ВТЭЦ-2 – Владивостокская ТЭЦ-2;

СКВ – селективное каталитическое восстановление;

СНКВ – селективное некаталитическое восстановление;

ТЭК – топливно-энергетический комплекс;

ПДК – предельно допустимая концентрация.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	12
1 Анализ методов и способов снижения выхода токсичных газообразных веществ с дымовыми газами энергетических котлов. Оценка эффективности.....	18
2 Основы сорбционных технологий в газовых средах. Характеристика и свойства сорбентов	26
2.1 Характеристика и свойства сорбентов	31
2.2 Характеристика и свойства цеолитов.....	36
3 Выбор и описание технологий и средств модернизации котельной установки с котлом БКЗ-210-140 Владивостокской ТЭЦ-2.....	41
3.1 О Владивостокской ТЭЦ-2.....	41
3.2 Выбор технологии очистки дымовых газов от оксидов азота	45
4 Оценочные расчеты.....	53
4.1 Расчет валовых выбросов вредных веществ.....	56
4.2 Аэродинамический расчет.....	64
4.3 Анализ полученных результатов	72
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	74
5.1 Расчет количества уходящих газов котла БКЗ-210-140, подлежащего очистке	74
5.2 Оценка экономического ущерба от загрязнения атмосферы оксидами азота.....	76
5.3 Капитальные затраты на сооружение газоочистного оборудования.....	77
5.4 Текущие расходы на содержание газоочистного оборудования	78
5.5 Экономическая эффективность.....	80
6 Социальная ответственность.....	81
6.1 Производственная безопасность.....	81
6.2 Экологическая безопасность.....	91
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	93
6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	94
Заключение	96
Список использованных источников	99
Приложение А	107

Графический материал:

на
отдельных
листах

ФЮРА 311614.001 ВО Компановка установки сорбентной очистки (вид сбоку)

ФЮРА 311614.002 ВО Компановка установки сорбентной очистки (вид сверху)

Введение

Потребление энергии человечеством непрерывно увеличивается. Связано это с тем, что развивающиеся страны, догоняя развитые, наращивают свой промышленный потенциал, вслед за чем, растет уровень жизни. Несовершенство хозяйственной деятельности человека, порождающее собой проблемы экологической безопасности, определяет уровень и перспективы социально-экономического развития общества. Если учитывать, что доля загрязнения воздуха природными источниками свыше 50% оксидов серы, 93% соединений азота, значительная доля оксидов углерода и ряд прочих загрязнителей, однако наибольшая опасность представляется искусственными источниками загрязнения воздуха, привязанные к деятельности человека, в первую очередь это сжигание топлива [1].

Электроэнергетика рождает свои экологические проблемы, связанные с соответствующими областями производства энергии: тепловой, атомной, и гидравлической энергетикой.

Сегодняшние реалии не позволяют вырабатывать энергию в необходимом количестве, не используя при этом органические топлива. Это нецелесообразно как по экономическим соображениям, так и по разведанным запасам этих топлив. С другой стороны, использование этих топлив предусматривает их сжигание на предприятиях металлургии и ТЭК. При сжигании органического топлива образуются дымовые газы, которые несут в себе вредные включения: оксиды азота, оксиды серы, оксиды углерода, золу уноса и другие. Негативное воздействие производственных мощностей на окружающую среду в большинстве стран подавляется с помощью мероприятий и устройств, снижающих содержание токсичных веществ в выбросах до значений, не превышающих нормы ПДК. Если говорить о предприятиях России, то в настоящее время эти средства на многих предприятиях могут не справляться с поставленными задачами по разным причинам.

В настоящее время именно тепловая энергетика имеет определяющее значение в производстве электроэнергии в мире. Преобладание тепловой энергетики сохранится и в обозримом будущем. Дальнейшее значение энергетики будет определяться возможностью обеспечения допустимого уровня воздействия тепловых электростанций на окружающую среду.

Одним из способов по удержанию и снижению уровня воздействия промышленных предприятий на окружающую среду является соглашение между государствами мира – Киотский протокол. В рамках этого документа страны участницы должны были в период с 2008 года по 2012 год сократить на 5% по сравнению с уровнем 1990 года объемы выбросов в атмосферу двуокиси углерода, метана и других промышленных газов.

С целью заключения нового глобального соглашения по климату, которое должно прийти на смену Киотскому протоколу после 2020 года, во Франции с 30 ноября по 12 декабря 2015 г. прошла 21-я конференция, проводимая в рамках Рамочной конвенции ООН по изменению климата и 11-я – в рамках совещания сторон по Киотскому протоколу. Главная задача конференции – подписание международного соглашения по поддержанию увеличения средней температуры планеты на уровне ниже 2°C.

Ниже приведем основные тезисы принятого Соглашения [2]:

1. Удержание роста температуры в пределах 1,5°C. Это будет достигнуто с помощью дотаций развивающимся странам на развитие экологически чистых источников энергии и сокращение добычи полезных ископаемых, применение новейших технологий.

2. Все развивающиеся страны публично предоставили свои национальные взносы, предназначенные для сокращения выбросов в ближайшие 20 лет. За неисполнение обязательств правительства могут быть привлечены к ответственности.

195 участников форума условились не допустить повышения средней температуры на планете к 2100 году более чем на 2°C по сравнению с доиндустриальной эпохой. Ученые считают, что более значительный рост

температуры может привести к необратимым глобальным последствиям для экологии планеты.

Для выполнения взятых на себя обязательств по итогам парижской конференции министерства природных ресурсов и экологии РФ был утвержден план мероприятий по обеспечению к 2020 г. сокращения объема выбросов парниковых газов. В частности, он предусматривает введение отчетности хозяйствующими субъектами по объемам выбросов, что явится предпосылкой создания внутрироссийской системы регулирования этих выбросов.

Действия по борьбе с изменением климата отвечают интересам России – по данным Минприроды, потепление в РФ происходит в 2,5 раза быстрее, чем в среднем по Земле. По словам главы Минприроды Сергея Донского, участие России в Парижском соглашении по климату станет стимулом для модернизации экономики и производства, а также для восстановления лесов страны.

В планах России к 2030 году сократить объемы выбросов парниковых газов на 70% от уровня 1990 году, что будет являться значительным вкладом Российской Федерации и оказание помощи в этом другим развивающимся странам [2].

Достаточно важным регионом, с точки зрения возведения промышленных предприятий и электрификации, является Дальний Восток России. С другой стороны необходим контроль и недопущение повышения уже существующих вредных выбросов.

Основываясь на мониторинге загрязнения воздуха в городах Приморского края проводимом Приморским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и ведомственной лабораторией федерального государственного предприятия «Дальневосточный завод «Звезда» в г. Большой Камень, можно с уверенностью сказать, что экологическая обстановка крайне неблагоприятная.

На стационарных постах производится контроль за содержанием в воздухе диоксида серы, растворимых сульфатов, взвешенных веществ (пыль),

оксида углерода, диоксида и оксида азота, аммиака, сероводорода, формальдегида, бенз(а)пирена и тяжелых металлов. Состояние воздуха в г. Владивосток на 2016 год имеет категорию качества воздуха на уровне «повышенный».

Неблагополучное экологическое состояние воздушного бассейна во Владивостоке обусловлено объёмами выбросов производственных объектов и большим количеством автотранспорта. Свой вклад вносят и выбросы технически устаревших производственных объектов. Более всего воздух в городах края загрязнён окислами азота.

Среднегодовая концентрация диоксида азота превышает допустимую норму в г. Владивосток в 1,8 раза [3].

Одним из основных источников загрязнения атмосферы в городах являются промышленные предприятия и автотранспорт. Увеличение количества транспортных средств и объемов производства приводит к увеличению выбросов и способствует росту уровня атмосферного загрязнения. Тем не менее, увеличение пропускной способности очистных сооружений и переход к малоотходным и безотходным технологиям позволяет сократить выбросы и уменьшить загрязнение воздуха.

В последние годы зафиксировано уменьшение загрязнения атмосферы пылью и диоксидом серы и увеличение окиси азота и окиси углерода. Снижение концентрации пыли происходит за счет увеличения количества и эффективности работы пылеулавливающего оборудования, а также общее снижение уровня производства. При этом закрывается масса небольших котельных, интенсивно загрязняющие приземный воздух продуктами сгорания топлива. Повышение содержания оксида азота и оксида углерода может быть связано с развитием энергетики, увеличением автомобильного парка и увеличением интенсивности дорожного движения [4].

На основании вышеизложенного **актуальность** работы определяется необходимостью создания малозатратных технологий очистки дымовых газов промышленных парогенераторов от оксидов азота, достигаемое снижение

выхода которых традиционными технологическими методами не достаточно по современным экологическим требованиям. Использование дешевого природного цеолита в качестве сорбента в процессах очистки дымовых газов энергетических котлов позволит значительно сократить расходы на природоохранные мероприятия и значительно повысить эффективность улавливания токсичных газообразных соединений.

В настоящей работе поставлена **цель** – разработать малозатратную технологию сокращения токсичных техногенных отходов из потока газовой среды для паровых котлов Владивостокской ТЭЦ-2 с целью улучшения экологических характеристик.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

- провести обзор использующих методов снижения выхода токсичных газообразных веществ с дымовыми газами энергетических котлов;
- проанализировать эффективности существующих методов очистки дымовых газов от оксидов азота;
- дать основы сорбционных технологий в газовых средах и свойств сорбентов;
- провести анализ состояния основного оборудования котельного цеха Владивостокской ТЭЦ-2;
- выбрать и описать технологию для сокращения выбросов котлов Владивостокской ТЭЦ-2;
- провести аэродинамический расчет котельной установки с устройством сорбентной очистки дымовых газов;
- провести расчет валовых вредных выбросов котлов с установленной установкой;
- проанализировать полученные результаты, определиться с технологическими параметрами очистки.

Новизна работы заключается в следующем:

Впервые предпринята адаптация метода сорбентной очистки к конкретному техническому объекту, в качестве которого принят действующий энергетический котел БКЗ-210-140.

Практическая значимость диссертационной работы определяется тем, что полученные результаты расчетов пригодны для использования в качестве расчетных технологических параметров устройств сорбентной очистки в системах газоудаления котельных установок Владивостокской ТЭЦ-2, а также возможно проецирование на станции с установленным аналогичным или подобным оборудованием.

Основные положения магистерской диссертации **докладывались и обсуждались** на Международной молодежной научной школе-семинаре «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2015 г.), на VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2015 г.), на XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2015 г.).

1 Анализ методов и способов снижения выхода токсичных газообразных веществ с дымовыми газами энергетических котлов. Оценка эффективности

В этой области широко используются мокрые золоуловители, батарейные циклоны, электрофилтры, впрыск аммиака в движущиеся газы, ступенчатое сжигание, дымовые трубы и многое другое. В качестве альтернативного варианта можно использовать одно из перспективных направлений в очистке дымовых газов – сорбентная очистка. В роли сорбентов может выступать большее количество разных материалов от природных цеолитов до синтетических силикагелей.

Ниже более подробно рассмотрим все перечисленные методы очистки и каждому дадим оценку эффективности.

Большинство способов и методов очистки дымовых газов делятся на две группы: производимые в пределах котла и за его пределами. Первая группа включает в себя технологические мероприятия по снижению выбросов оксидов азота: аммиачно-каталитический метод в области температур 350–400°C, селективное восстановление оксидов азота аммиаком, а также связывание NO_x известью, вводимой в топку котла в качестве присадки к топливу. Вторая группа представлена следующими способами: мокро-сухой, мокроизвестковый, магнезитовый, аммиачно-каталитический (после сероочистки), электронно-лучевой и аммиачно-озонный методы.

Одним из наиболее важных способов денитрификации дымовых газов с позиции утилизации продуктов реагирования является окисление NO до N_2O_5 с дальнейшим растворением в воде, после чего получившаяся кислота нейтрализуется аммиаком. На выходе образуется сульфат аммония, который возможно использовать в качестве удобрений. Действующая установка смонтирована на энергоблоке 200 МВт, который работает на антраците, и предполагает очистку от NO_x до 90% и расход 25%-ного раствора аммиака –

1386 кг/ч [5]. Основной недостаток такой установки заключается в существенной коррозии оборудования.

Из известняковых методов самым отработанным является аммиачно-каталитический метод, который делится на [6]: селективное каталитическое восстановление оксидов азота аммиаком на сотовых керамических катализаторах (СКВ); селективное некаталитическое восстановление оксидов азота аммиаком (СНКВ).

СКВ: при помощи катализатора и температуры в интервале 320–400°C протекает восстановление аммиаком молекулярного азота более 90% NO_x и образование воды.

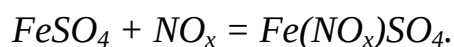
СНКВ: восстановление NO выполняется в диапазоне температур 870–1100°C при помощи химических реакций с аммиаком, циануровой кислотой, мочевиной, сульфатом аммония, карбонатом аммония и прочими. Тем не менее, с позиции экономики коммерческое развитие данного метода предполагает две технологии, которые используют в качестве восстановителей NO_x водный раствор мочевины и аммиак.

СКВ – способ является более экономичным по капитальным вложениям, потому как не требует дополнительного нагрева пара. СНКВ – способ считается более удобным при модернизации ТЭС, в виду того, что азотоочистное оборудование может быть свободно размещено [7]. При этом необходимо учесть, что технология каталитического восстановления на станциях России ещё не освоена, отсутствуют дешевые отечественные катализаторы, также аммиак является дефицитным и достаточно дорогим сырьём.

Эффективным методом представляется каталитическая очистка газов от NO_x в присутствии CH_4 [8], при которой уходящие газы смешиваются с топочными газами, затем с природным газом и пропускаются через катализатор PdAl_2O_3 при 700–750°C, где происходит восстановление NO_x до N_2 . Затем к газам добавляется избыточный воздух по отношению к горючим примесям, и смесь газов выдерживается не менее 0,05 с. После чего очищаемый газ проводят сквозь второй катализатор конверсии метана на основе NiOAl_2O_3 , где

происходит окисление горючих. Температура в зоне окисления поддерживается на 20–40°C выше, по сравнению с зоной первого катализатора.

Очистка обеспыленных дымовых газов от оксида азота предполагает электроциклический способ нейтрализации оксидов азота [9]. Процесс нейтрализации заключается в следующем: обеспыленные дымовые газы, охлаждённые в теплообменнике до 50°C, направляются в адсорбер, где смешиваются с встречным потоком раствора железного купороса $FeSO_4$. Купорос взаимодействует (адсорбирует) с оксидами азота по следующей реакции:



С помощью этого способа достигается высокий уровень очистки дымовых газов – до 90%.

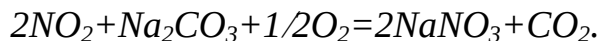
В ряде стран, где широко используются методы очистки дымовых газов, например, в США, учитывая невозможность размещения громоздкого оборудования мокрой известковой серо- и азотоочистки, часто пользуются другими методами с применением различных сорбентов. Эффективность таких методов обычно ниже традиционных, однако их применение не предполагает использование дополнительных площадей, также их реализация не требует огромных капитальных вложений, а расходы на эксплуатацию сравнительно низкие [7].

В последнее время распространение получили абсорбционные методы очистки дымовых газов от оксида азота, основным из этих методов считается абсорбция щелочным раствором оксидов азота. Вид используемой щелочи в значительной степени определяет экономичность и эффективность процесса. Наибольшим улавливанием относительно диоксида азота обладают щелочные растворы извести или кальцинированной соды.

Тем не менее, совместное присутствие в газах диоксида серы и диоксида азота предполагает образование сульфата кальция и карбоната кальция при использовании извести, что, как известно, приводит к трудностям при работе

газоочистных установок, в связи с этим, известковый способ очистки газов применяется крайне редко.

Хемосорбция диоксида азота при помощи раствора соды протекает по уравнению:



Полученный в результате реакции нитрат натрия, может применяться в качестве азотного удобрения.

Диоксид азот совместно с растворами сорбентов крайне эффективно взаимодействует при достаточно низких температурах (20–40°C), что приводит к необходимому охлаждению газов перед очисткой.

Степень абсорбции диоксида азота крайне низкая. Если концентрация соды в растворе порядка 100 г/л, то максимальная степень абсорбции диоксида азота обычно не превышает 78% [10].

Ученые из Японии [11] разработали упрощенную полусухую технологию, которая предполагает двухэтапную обработку дымового газа: на первой стадии в топку котла впрыскивают тонко измельченный известняк, а на второй в поток дымовых газов вводят воду.

Совместное удаление NO_x и SO_2 с помощью впрыскиваемого сухого сорбента описано в работе [12]. Сорбент – известково-мочевинный гидрат вводится в зону дожигания (на выходе из топки). Нормальная эксплуатация возможна при соотношении $\text{Ca} : \text{S}$, равного 2, и мочевины: NO_x , равного 0,5. Максимальная эффективность известково-мочевинного гидрата при улавливании SO_2 – достигается при температурах 850–1200°C, а NO_x – при температурах 850–1100°C.

Английские ученые полагают, что при работе слоевых топок наибольшей эффективностью обладает очистка газов от NO_x с использованием сорбентов в псевдоожиженном слое [13]. В роли сорбентов в зоне первичного горения (нижняя часть топки) могут быть использованы порошкообразные доломит, известняк, известь, карбонат калия, Fe_2O_3 и зольный щелок.

Коэффициент очистки от SO_2 при этом составляет 50–90%, время взаимодействия – 0,04–10 с.

Еще один способ снижения выбросов оксидов серы и оксидов азота основывается на связывании с помощью адсорбента серы топлива. Адсорбент направляется вместе с топливом в слой и на снижение содержания NO_x за счет сниженного уровня температур в зоне факела горения, что позволяет восстановить их до безвредного молекулярного азота [14].

Использование данного метода позволяет снизить количество термических оксидов азота даже при сжигании твердого топлива [15]. Кроме этого, этот метод способствует получению из дымовых газов строительных материалов – серы и гипса [16].

Сжигание топлива с использованием присадок – это один из немногих методов, который может позволить не только конечное сырье, но и доход от его продажи. Степень очистки дымовых газов при этом для SO_x может достигать 90% и выше, а для NO_x – 35% [17].

Рассмотренные выше способы позволяют решать лишь малую часть проблем, которые связаны с становлением современных технологий очистки дымовых газов тепловых электростанций. Практически все они являются технологически сложными, громоздкими и весьма дорогими.

Ниже приведем способы позволяющие повысить степень очистки газов от NO_x , они основаны на использовании разных сорбентов.

При использовании следующего способа дымовые газы обрабатываются хлорсодержащим водным раствором, в котором применяется хлорная известь в качестве хлорсодержащего вещества. Эта известь включает в себя поверхностно-активные вещества. Процесс проводится при интенсивной диспергации жидкости в газ [18]. Этот способ позволяет снизить концентрацию NO_x в газа на 90%.

Еще один способ имеет отношение к технологии обезвреживания дренажных выбросов, содержащих NO_x , а также помогает снижать потребление энергии с помощью уменьшения времени нагрева углеродистого

материала [19]. Изначально проводится адсорбция NO_x на двухслойном адсорбенте, состоящего из природного клиноптилолита и активированного угля. Затем их десорбируют, а получившиеся продукты десорбции пропускаются через активированный уголь, где протекает восстановление NO_x до N_2 . Этот метод позволяет сократить время нагрева углеродистого материала на этапе восстановления в 8–10 раз и полное восстановление NO_x .

В настоящее время очень широко представлены технологии по снижению выбросов оксидов азота из топочных устройств, основанные на влиянии на процессы образования [20]. Оксиды азота образуются в зоне горения топлива по следующим механизмам:

1) «термическому», в результате диссоциации молекул O_2 на радикалы и атомы и дальнейшего окисления молекул N_2 (происходит из значительной зависимости выхода NO от температуры, что подтверждается наблюдениями за работой крупных промышленных установок [21, 22]);

2) «быстрому», действующему в самом начале зоны горения, основой которого служат реакции с участием радикалов CH , CH_2 ; он определяется минимальным выходом NO при горении газа, сильно зависит от структуры молекулы топлива и слабо от температуры [23];

3) «топливному», зависящему от включения азота в топливе и избытка воздуха [24–26].

Снижение образования оксидов азота обычно представляет собой подавление или ликвидацию «термических» NO_x , а также «топливных» NO_x . Сниженное выделение «термических» NO_x достигается за счет воздействия на температуру сгорания, что гарантируется вводом газов рециркуляции, пара, воды в зону горения или в дутьевой воздух, а также ступенчатым сжиганием топлива, понижающим температурный уровень и концентрацию кислорода в зоне высоких температур. Выход «топливных» NO_x в меньшей мере зависит от температуры, и заметно зависит от избытка воздуха, таким образом, ступенчатое сжигание топлива более эффективно. Решающее влияние на выход оксидов азота обеспечивает геометрия горелочных устройств, так как именно

здесь происходит процесс смешения воздуха, который определяет условия выхода NO_x , с топливом [27]. Как показывают многочисленные испытания, использование технологий подавления образования оксидов азота, позволяет добиться снижения их содержания до 70% [27, 28].

Реконструкция существующего оборудования, однако, не решит все проблемы по улучшению экологической ситуации в отрасли. Дальнейшее сокращение выбросов приводит к потере эффективности котлов и может снизить их надежность [29]. Эта проблема может быть решена путем очистки дымовых газов. В этом случае, следует отметить, что наиболее перспективным способом решения экологических проблем в тепловой энергетике заключается в оптимальной комбинации технологий подготовки топлива, его сжигания и методов очистки дымовых газов.

В последнее время технология денитрификации дымовых газов развивается главным образом в отношении котлов, сжигающих твердое топливо, для которых осуществление технологических способов подавления образования оксидов азота, сопряжена с большими трудностями. Известные методы очистки дымовых газов от оксидов азота развиваются по следующим направлениям:

- а) окислительные, основанные на окислении оксида азота до диоксида с последующим его поглощением различными поглотителями;
- б) восстановительные, основанные на восстановлении оксида азота до азота и кислорода с применением катализаторов;
- в) сорбционные, основанные на поглощении оксидов азота различными сорбентами.

Из перечисленных именно сорбционные методы очистки дымовых газов от оксидов азота являются перспективными, поскольку они гораздо менее затратные при их реализации и эксплуатации. В связи с этим, в последние годы внимание ученых-исследователей и специалистов отрасли привлекли синтетические и природные цеолиты. Из-за высоких финансовых затрат на получение синтетических цеолитов повышенный интерес проявляется к

природным цеолитам. Природный цеолит, имеющий сильно развитую внутреннюю поверхность, способен адсорбировать много разных вредных компонентов газовой смеси. Этот факт позволяет рассматривать данный минерал как перспективный сорбент для очистки дымовых газов тепловых электростанций, от токсичных и канцерогенных веществ, в частности от оксидов азота и серы.

Применение в роли адсорбента гранул алюмосиликата цеолитной структуры с кремнезёмным модулем, пропущенных через раствор карбамида, позволяет очищать 15000 м^3 газа в пересчёте на 1 м^3 носителя и повысить степень очистки от NO_x до 99,5% [30].

В комплексе мер, направленных на снижение токсичных выбросов с дымовыми газами от котлов, возможно применение минеральных остатков твердого топлива, в частности, уноса после сжигания кузнецких и канско-ачинских углей [31, 32]. Состав уноса определяется рядом компонентов, таких как Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , MgO , которые могут повлиять на уменьшение содержания вредных компонентов в дымовых газах. Например, оксиды азота, как полярные молекулы, могут вступать во взаимодействие с оксидами кремния и алюминия в процессе физической адсорбции [33], а диоксид серы может химически реагировать с оксидами кальция и магния с образованием нетоксичных веществ.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Оценка экономического ущерба от загрязнения атмосферы проводится применительно к установке, прототипом которой является установка для очистки дымовых газов от оксидов азота (см. гл. 5), при условии размещения ее на всасывающей стороне дымососа котлоагрегата БКЗ-210-140.

5.1 Расчет количества уходящих газов котла БКЗ-210-140, подлежащего очистке

5.1.1 Давление перегретого пара [73]:

$$P_{пп} = \frac{P_6}{1,13} = \frac{15,5}{1,13} = 13,7 \text{ МПа},$$

где P_6 – давление в барабане, МПа.

5.1.2 Давление питательной воды:

$$P_{пв} = P_6 + 0,1P_6 = 15,5 + 0,1 \cdot 13,7 = 16,87 \text{ МПа}.$$

5.1.3 Температура перегретого пара [70]:

$$t_{nn} = 560^\circ\text{C}.$$

5.1.4 Температура питательной воды [70]:

$$t_{nv} = 230^\circ\text{C}.$$

5.1.5 Энтальпия перегретого пара [74]:

$$i_{пп} = 3486 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

5.1.6 Энтальпия питательной воды [74]:

$$i_{пв} = 993,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

5.1.7 Энтальпия продувочной воды [74]:

$$i_{кип} = 1650 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

5.1.8 Расход перегретого пара:

$$D_{пп} = 210 \frac{\text{т}}{\text{ч}} = 58,33 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

5.1.9 Расход продувочной воды:

$$D_{\text{пр}} = \frac{P}{100} \cdot D_{\text{пп}} = \frac{3}{100} \cdot 58,33 = 1,75 \frac{\text{кг}}{\text{с}},$$

где P – величина непрерывной продувки, % [73].

5.1.10 Низшая теплота сгорания сжигаемого топлива (Природный газ) [71]:

$$Q_p^{\text{н}} = 36760 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

5.1.11 Коэффициент полезного действия (брутто) [70]:

$$\eta_{\text{к}} = 93,5 \, \%.$$

5.1.12 Полезно использованное тепло парогенератора:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ка}} &= D_{\text{пп}}(i_{\text{пп}} - i_{\text{пв}}) + D_{\text{пр}}(i_{\text{кип}} - i_{\text{пв}}) = \\ &= 58,33(3486 - 993,6) + 1,75(1650 - 993,6) = 146530,4 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}. \end{aligned}$$

5.1.13 Расход топлива, подаваемого в камеру горения:

$$B = \frac{Q_{\text{ка}}}{Q_p^{\text{н}} \cdot \eta_{\text{к}}} \cdot 100\% = \frac{146530,4}{36760 \cdot 93,5} \cdot 100 = 4,263 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

5.1.14 Расчетный расход топлива:

$$B_p = B \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) = 4,263 \cdot \left(1 - \frac{0,05}{100}\right) = 4,26 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

где q_4 – потери тепла с механическим недожогом [71].

5.1.15 Теоретический объем газов [70]:

$$V_{\text{г}}^{\text{о}} = 10,8 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

5.1.16 Теоретический объем воздуха [70]:

$$V_{\text{в}}^{\text{о}} = 9,7 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

5.1.17 Коэффициент избытка воздуха в дымовых газах на выходе из котельной установки:

$$\alpha = 1,4.$$

5.1.18 Действительный объем газов:

$$V_{\text{г}} = V_{\text{г}}^{\text{о}} + 1,016(\alpha - 1)V_{\text{в}}^{\text{о}} = 10,8 + 1,016(1,4 - 1)9,7 = 14,74 \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}}.$$

5.1.19 Количество газов, подлежащих очистке:

$$G_{\Gamma}^{\kappa} = V_{\Gamma} \cdot B_p \cdot 3600 = 14,74 \cdot 4,26 \cdot 3600 = 226 \cdot 10^3 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}.$$

5.2 Оценка экономического ущерба от загрязнения атмосферы оксидами азота

5.2.1 Экономическая оценка ущерба, причиняемого годовыми вредными выбросами котельной установки:

$$y = \gamma \cdot \sigma \cdot f \cdot M, \text{ руб/год}, \quad (15)$$

где $\gamma = 1500$ руб/усл. т. – константа ущерба [75] с пересчетом на цены 2016 г. [76]; $\sigma = 8$ – безразмерная величина, характеризующая территорию, входящую в зону активного загрязнения тепловой электростанции [75]; f – безразмерная поправка, учитывающая условия рассеивания вредного вещества (NO_x) в атмосфере:

$$f = \frac{100}{100 + \varphi \cdot h} \cdot \frac{4}{1 + U}, \quad (16)$$

где φ – безразмерная поправка на подъем факела выбросов в атмосферу:

$$\varphi = 1 + \frac{\Delta T}{75^{\circ}\text{C}} = 1 + \frac{136,6}{75} = 2,82,$$

где ΔT – среднегодовое значение разности температур в устье источника (трубы) и в окружающей атмосфере на уровне устья:

$$\Delta T = \vartheta_{yx} - \Delta t = 140 - 3,4 = 136,6^{\circ}\text{C},$$

где $\Delta t = 3,4^{\circ}\text{C}$ [75].

Тогда

$$f = \frac{100}{100 + \varphi \cdot h} \cdot \frac{4}{1 + U} = \frac{100}{100 + 2,82 \cdot 180} \cdot \frac{4}{1 + 3} = 0,165,$$

где U – среднее значение модуля скорости ветра на уровне флюгера [75]; h – высота дымовой трубы, м.

5.2.2 Годовое количество выбросов оксидов азота котлоагрегатом при минимальной концентрации оксидов азота в уходящих газах $C = 400$ мг/м³:

$$m_{NO_x}^e = G_e^k \cdot \tau_p \cdot C \cdot 10^{-9} = 226 \cdot 10^3 \cdot 6000 \cdot 400 \cdot 10^{-9} = 542,4 \text{ т/год},$$

где τ_p – количество часов работы котла в год, ч/год.

5.2.3 Показатель относительной агрессивности NO_x [75]:

$$A_{NO_x} = 40 \text{ усл. т/т.}$$

5.2.4 Приведенная масса выбросов NO_x в атмосферу:

$$M_{NO_x}^1 = 40 \cdot 542,4 = 21696 \text{ усл. т/год.}$$

5.2.5 Ущерб от загрязнения без очистки дымовых газов:

$$y_1 = 1500 \cdot 8 \cdot 0,165 \cdot 21696 = 42958080 \text{ руб/год.}$$

5.2.6 Принимаем снижение выбросов при использовании природного цеолита 91% [60]. Поэтому

$$M_{NO_x}^2 = 0,09 \cdot 21696 = 1952,6 \text{ усл. т/год.}$$

5.2.7 Ущерб от загрязнения атмосферы с использованием очистки дымовых газов от оксидов азота:

$$y_2 = 1500 \cdot 8 \cdot 0,165 \cdot 1952,6 = 3866227,2 \text{ руб/год.}$$

5.2.8 Полезный эффект от очистки:

$$\Xi_{\Pi} = y_1 - y_2 = 42958080 - 3866227,2 = 39091852,8 \text{ руб/год.}$$

5.3 Капитальные затраты на сооружение газоочистного оборудования

5.3.1 Для параллельного функционирования систем очистки и регенерации промышленная установка должна содержать 10 реакционных участков (комплекса реакционных колон см. п. 5.4), что обеспечивает возможность рациональной компоновки оборудования в условиях ТЭС, и повышает ремонтпригодность. Исходя из этого пропускная способность установки для котлоагрегата БКЗ-210-140 по сравнению с пропускной

способностью опытно-промышленной установки [60] с сохранением скорости газов должна быть увеличена в 4,6 раза:

$$\frac{G_z^k}{\frac{n}{2} \cdot G_z^y} = \frac{226 \cdot 10^3}{\frac{10}{2} \cdot 9900} = 4,6,$$

где G_z^y – расход газов через ОПУ, $\text{м}^3/\text{ч}$; n – количество реакционных участков на 1 котлоагрегат.

Металлозатраты приведены по ценникам ООО «УралМеталлЭнерго» в таблице 3 по состоянию на май 2016 г.

Таблица 1 – Данные по стоимости металла

№ пп	Наименование (см. рис. 3)	Масса металла, кг	Стоимость, руб.	Кол- во
1.	Бункер сорбента	12984	278134	3
2.	Циклон	4949	153107	8
3.	Конденсатор	35400	2611439	2
4.	Реакционный участок	39273	1214935	8
5.	Сушильный агрегат	18314	392239	2
6.	Трубопровод газовый	152604	4578120	–
7.	Трубопроводы пара и воды	47271	1462372	–
Металлозатраты K_M			25217256	

5.3.2 Себестоимость установки [77]:

$$C_y = 1,5K_M = 1,5 \cdot 25217256 = 37825884 \text{ руб.}$$

5.3.3 Затраты на монтаж оборудования [77]:

$$K_{MOH} = 0,1K_M = 0,1 \cdot 25217256 = 2521725,6 \text{ руб.}$$

5.3.4 Капитальные затраты на сооружение оборудования:

$$K = C_y + K_{MOH} = 37825884 + 2521725,6 = 40347609,6 \text{ руб.}$$

5.4 Текущие расходы на содержание газоочистного оборудования

5.4.1 Сорбционная емкость цеолита принимается средней из диапазона $60 \div 180 \text{ мг/г}$ [60]:

$$A = 120 \text{ мг/г} = 120 \cdot 10^{-3} \text{ т/т.}$$

5.4.2 Количество поглощаемых оксидов азота:

$$m_{NO_x} = m_{NO_x}^e \cdot 0,91 = 542,4 \cdot 0,91 = 493,6 \text{ т/год.}$$

5.4.3 Расчетный расход цеолита на адсорбцию NO_x :

$$B_y^{adc} = \frac{m_{NO_x}}{A \cdot 10^{-3}} = \frac{493,6}{120 \cdot 10^{-3}} = 4113,33 \text{ т/год.}$$

5.4.4 Эффективность регенерации [60]:

$$A_{рег} = 70\%$$

5.4.5 Эффективность работы циклона [78]:

$$\Xi_{ц} = 80 \%$$

5.4.6 Невосполняемый расход цеолита:

$$B_y = B_y^{adc} \left(1 - \frac{A_{рег}}{100}\right) \cdot \left(1 - \frac{\Xi_{ц}}{100}\right) = 4113,33 \left(1 - \frac{70}{100}\right) \cdot \left(1 - \frac{80}{100}\right) = 246,8 \text{ т / год}$$

5.4.7 Цена тонны цеолитового сырья Чугуевского месторождения Приморского края [23] с учетом пересчета на цены 2016 г.:

$$Ц_{т.ц.} = 4000 \text{ руб/т.}$$

5.4.8 Себестоимость природного цеолита:

$$C_y = B_y \cdot Ц_{т.ц.} = 246,8 \cdot 4000 = 987200 \text{ руб/год.}$$

5.4.9 Издержки на заработную плату [77]:

$$C_{зн} = 0,3K = 0,3 \cdot 40347609,6 = 12104282,9 \text{ руб/год.}$$

5.4.10 Издержки на научно-исследовательскую работу [77]:

$$C_{НИР} = 0,1(K + C_{зн}) = 0,1(40347609,6 + 12104282,9) = 5245189,2 \text{ руб / год.}$$

5.4.11 Ежегодные амортизационные отчисления:

$$C_a = a_a \cdot K = 0,087 \cdot 40347609,6 = 3510242,03 \text{ руб/год,}$$

где a_a – средневзвешенная норма амортизации энергетического оборудования [79].

5.4.12 Издержки на текущий ремонт [77]:

$$C_{тр} = 0,2C_a = 0,2 \cdot 3510242,03 = 702048,4 \text{ руб/год.}$$

5.4.13 Годовые текущие издержки у потребителя:

$$И = C_y + C_{зн} + C_{тр} + C_{НИР} + C_a = 987200 + 12104282,9 + 702048,4 + 5245189,2 + 3510242,03 = 22548962,6 \text{ руб/год.}$$

5.4.14 Прочие расходы [77]:

$$C_{np} = 0,1I = 0,1 \cdot 22548962,6 = 2254896,26 \text{ руб/год.}$$

5.5 Экономическая эффективность

5.5.1 Годовой экономический эффект от работы очистного оборудования на ТЭС:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{nom} = \mathcal{E}_n - (I + C_{np}) &= 39091852,8 - (22548962,6 + 2254896,26) = \\ &= 14287994 \text{ руб/год.} \end{aligned}$$

5.5.2 Расчетный срок окупаемости оборудования:

$$O = \frac{K}{\mathcal{E}_{nom}} = \frac{40347609,6}{14287994} = 2,82 \text{ года.}$$

Вывод: Установка по очистке дымовых газов от оксидов азота с применением природного цеолита менее чем за три года эксплуатации полностью окупает капитальные вложения на производство и монтаж. В дальнейшем данное очистное оборудование будет приносить высокую прибыль.

СПИСОК

опубликованных научных и учебно-методических работ
Мордвина Дмитрия Валерьевича

№ п/п	Наименование работы, ее вид	Форма работы	Выходные данные	Объем в с.	Соавторы
1	2	3	4	5	6
а) научные работы					
1.	Исследование сорбционной активности природных и техногенных материалов к нефтепродуктам	Электронный ресурс	Современные техника и технологии: сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 5-9 октября 2015 г.: в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Т. 1. – С. 103–105.	3	–
2.	Исследование десульфуризации дымовых газов сорбцией золой уноса	Электронный ресурс	Современные техника и технологии: сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 5-9 октября 2015 г.: в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). –Т. 1. – С. 106-108.	2	–
б) авторские свидетельства, патенты, дипломы, лицензии, информационные карты, алгоритмы, проекты					
–	–	–	–	–	–
в) учебно-методические работы					
–	–	–	–	–	–

Соискатель

СПИСОК ВЕРЕН:

Зав. каф. ПГС и ПГУ **М.О.**

Ученый секретарь ТПУ



(Заворин А.С.)

(Ананьева О.А.)

2016 г.