

На правах рукописи



Ижганайтис Максим Иозо

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОТЛОАГРЕГАТОВ УГОЛЬНЫХ ТЭС ПРИ
ИХ МОДЕРНИЗАЦИИ С УЧЕТОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИИ

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Тюрина Элина Александровна

Официальные оппоненты: **Елсуков Владимир Константинович**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Братский государственный университет», кафедра «Промышленная теплоэнергетика», профессор

Дамбиев Цырен Цыдэнович
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления», кафедра «Тепловые электрические станции», профессор

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск**

Защита диссертации состоится «18» января 2018 г. в 09:00 на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте <http://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2017-7/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 003.017.01,
доктор технических наук, профессор



**Клер
Александр Матвеевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. Существенная часть потребности в тепловой и электрической энергии в России и мире обеспечивается тепловыми электрическими станциями, использующими органическое топливо – природный газ, уголь, мазут – в качестве первичного источника энергии. Прогноз потребления первичных энергоресурсов предприятиями энергетической отрасли в среднем по миру предполагает сохранение доминирующей роли угля. В России же на данный момент лидирующую роль занимает природный газ, однако необходимость увеличения доли угольных электростанций в структуре генерирующих мощностей обусловлена высоким значением отношения объема разведанных запасов угля к скорости его добычи и потребления.

Следует учесть, что среди разведанных на территории России запасов высококачественных углей, с невысоким содержанием золы (до 10 – 16 %) и серы (0,3 – 0,8 %), меньше половины, а около трети всех запасов не соответствуют мировым стандартам качества. В связи с этим возникает необходимость решения технических проблем, связанных с использованием на ТЭС низкокачественных углей, в условиях отсутствия стимулов к повышению качества угля и глубины его переработки, получению новых видов высококачественной угольной продукции.

Одной из таких проблем является процесс низкотемпературной коррозии, протекающий на конвективных поверхностях нагрева котлоагрегатов, сжигающих сернистые угли. Особенно остро эта проблема проявляется при переводе котельных агрегатов, спроектированных для сжигания высококачественных, низкосернистых углей, на сжигание углей с более высоким содержанием серы. Исследование возможности и целесообразности модернизации таких агрегатов с учетом процесса низкотемпературной коррозии является актуальной задачей.

Необходимо отметить, что исследованиям способов снижения низкотемпературной коррозии посвящено достаточно большое количество работ как в России, так и в других странах мира. Эти исследования в большинстве своем основаны на вариантных расчетах схем, реализующих соответствующие способы, но без выполнения комплексной оптимизации схем и их параметров и без учета специфики задачи модернизации действующего оборудования.

Степень разработанности темы. Изучению возможностей снижения влияния процесса низкотемпературной коррозии на работу элементов котлоагрегата и его элементов уделено большое внимание в работах как отечественных, так и зарубежных специалистов. Исследованиями природы и характера процессов, приводящих к возникновению низкотемпературной коррозии, а также оценкой влияния параметров эксплуатируемого оборудования на интенсивность низкотемпературной коррозии, занимались Ebara R., Tanaka F., Kawasaki M, Магадеев В.Ш., Rockel M.B., Bender R., Zaki Ahmad, Горохов В.А, Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В., Holmes D.R., Внуков А.К и др.

Теоретическим и практическим исследованиями методов повышения надежности конвективных поверхностей нагрева котлоагрегатов, сжигающих сернистые топлива, посвящены работы таких авторов, как Бугай Н.В., Березина Т.Г., Трунин И.И., Шмиголь И.Н., Абрамов В.В., Bruce G. Miller, Basu P, Асланян Г.С., Пермяков Б.А., Ежов В.С., Семичева Н.Е., Добряков Т.С., Мигай В.К., Назаренко В.С., Апатовский Л.Е., Фомина В.Н., Халупович В.А., Батухтин А.Г., Сафронов П.Г., Кириллов М.В. и др.

Математическому моделированию и оптимизационным исследованиям сложных энергетических установок уделено внимание в работах Андриющенко А.И., Аминова Р.З., Попырина Л.С., Клера А.М., Декановой Н.П., Wojci L., Neaga C. и др.

Разработке математических и статистических методов исследования процесса низкотемпературной коррозии посвящены работы Alireza Bahadori, Xiaona Song, Changshun Zhang, Pei Li, Jun Zheng, Yanping Hu, Xiaoxia Hou, Gang Xu, A. L. Ma, Горячкин В.Ю., Корниенко В.С., Романова В.А., Дмитриева Г.И., Щербинкина В.И., Проценко Г.В. и др.

Анализ существующих работ, посвященных оптимизационным исследованиям теплоэнергетических установок, в частности – котельных агрегатов, показал, что прежде не проводилось оптимизационных исследований котельных агрегатов при их модернизации или реконструкции. В основном в них представлены результаты оптимизации режимов работы действующего оборудования, либо результаты схемно-параметрической оптимизации только конструируемого оборудования. Решение же задачи оптимизации оборудования при его модернизации предполагает совмещения этих направлений исследований с совместным проведением оптимизационных поверочных и конструкторских расчетов.

Необходимо отметить, что оптимизационных исследований способов снижения низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева котлоагрегата с определением по выбранному критерию оптимальности сочетания конструктивных параметров отдельных элементов и режимных параметров работы установки также прежде не проводилось.

Цель работы. В данной работе основной задачей является проведение комплексной технико-экономической оптимизации схем и параметров котлоагрегата угольной ТЭС при его модернизации с учетом низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя с использованием разработанных математических моделей вариантов реконструированной установки по выбранному критерию экономической эффективности.

Также ставится задача разработки методики аналитического определения температуры точки росы дымовых газов (продуктов сгорания угля) – ключевого параметра для проведения оптимизационных исследований, характеризующего процесс низкотемпературной коррозии, – на основании расчета термодинамического равновесия протекающих химических реакций образования серной кислоты. Необходимость создания такой методики связана с тем, что существующие способы расчета температуры точки росы не учитывают (или учитывают, но не всегда адекватно отражают) влияния совокупности протекающих в элементах котлоагрегата процессов на значение данного параметра.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие основные задачи исследования.

1. Постановка задачи комплексной технико-экономической оптимизации схем и параметров котлоагрегатов угольных ТЭС при их модернизации с учетом низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя с совместным выполнением оптимизационных поверочных и конструкторских расчетов.

2. Разработка методики определения температуры точки росы дымовых газов на основании расчета термодинамического равновесия протекающих химических реакций образования серной кислоты с определением фазового состава газовой смеси.

3. Реализация на базе программно-вычислительного комплекса математического моделирования и оптимизации теплоэнергетических установок СМПП (система машинного построения программ) математических моделей котлоагрегатов, позволяющих: верифицировать математическую модель определения температуры точки росы дымовых газов на основании расчета термодинамического равновесия; провести оптимизационные исследования способов снижения влияния процесса низкотемпературной коррозии на работу котлоагрегата.

4. Проведение комплексных технико-экономических исследований вариантов модернизации котельного агрегата с целью снижения низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя по выбранному критерию экономической эффективности. Анализ возможности внедрения исследуемых способов снижения низкотемпературной коррозии на фактически действующем оборудовании.

Объектом исследований является действующий котельный агрегат угольной ТЭС, сжигающий сернистое топливо, низкотемпературные поверхности нагрева которого подвержены низкотемпературной коррозии.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем.

1. Сформулирована задача комплексной технико-экономической оптимизации схем и параметров котлоагрегатов угольных ТЭС при их модернизации с учетом низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя с совместным выполнением оптимизационных поверочных и конструкторских расчетов.

2. Разработана методика и соответствующая математическая модель определения температуры точки росы дымовых газов на основании расчета термодинамического равновесия химических реакций образования серной кислоты с учетом конденсированного состояния.

3. Разработана математическая модель котлоагрегата БКЗ-75-39ФБ, идентифицированная на основании полученных в ходе испытаний экспериментальных данных и позволяющая верифицировать математическую модель определения температуры точки росы на основании расчета термодинамического равновесия химических реакций образования серной кислоты.

Разработаны математические модели вариантов модернизации котлоагрегата БКЗ-420-140, пригодные для проведения совместных оптимизационных поверочных и конструкторских расчетов.

4. Проведены оптимизационные технико-экономические исследования вариантов модернизации котлоагрегата БКЗ-420-140 по выбранному критерию экономической эффективности с целью снижения низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя с совместным выполнением оптимизационных поверочных и конструкторских расчетов.

Практическая значимость выполненного исследования связана с решением реальной практической задачи, поэтому ее результаты могут рассматриваться как первая итерация в подготовке частных решений с возможностью получения технической и экономической оценок вариантов модернизации действующих котельных агрегатов с учетом низкотемпературной коррозии их воздухоподогревателей.

Разработанные математические модели могут быть использованы при исследовании возможности реализации иных способов снижения влияния низкотемпературной коррозии на эффективность работы котельных агрегатов как при их модернизации, так и на этапе предпроектных разработок.

Методология и методы исследования. В работе используется методология системных исследований сложных теплоэнергетических установок на основании комплексных оптимизационных исследований с использованием подробных математических моделей элементов этих установок, с учетом нелинейности происходящих в них процессов и получением набора технико-экономических показателей эффективности их работы.

Разработка математических моделей котлоагрегатов, оптимизационные исследования вариантов модернизации котельного агрегата с целью снижения низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя по выбранному критерию экономической эффективности, разработка математической модели определения температуры точки росы дымовых газов на основании расчета термодинамического равновесия химических реакций образования серной кислоты проводились с использованием программно-вычислительного комплекса «Система машинного построения программ», разработанного и применяемого в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева.

Автор защищает.

1. Методику комплексной технико-экономической оптимизации схем и параметров котлоагрегатов угольных ТЭС при их модернизации с учетом низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя с совместным выполнением оптимизационных поверочных и конструкторских расчетов.

2. Методику определения температуры точки росы дымовых газов на основании расчета термодинамического равновесия химических реакций образования серной кислоты с учетом конденсированного состояния.

3. Набор конструктивных и режимных параметров представленных вариантов модернизации котлоагрегата БКЗ-420-140, полученных в результате оптимизационных исследований по выбранному критерию экономической эффективности.

4. Оценки возможности внедрения представленных вариантов модернизации фактически действующего котельного агрегата с целью снижения низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя.

Личный вклад автора.

1. Поставлена задача и разработана методика комплексной технико-экономической оптимизации схем и параметров котлоагрегатов угольных ТЭС при их модернизации с учетом низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя по выбранному критерию экономической эффективности.

2. При участии автора разработана методика определения температуры точки росы дымовых газов на основании расчета термодинамического равновесия химических реакций образования серной кислоты с учетом конденсированного состояния.

3. Разработаны математические модели котлоагрегата БКЗ-75-39ФБ, базовой компоновки котлоагрегата БКЗ-420-140, вариантов модернизации котлоагрегата БКЗ-420-140, расчета температуры точки росы дымовых газов на основании представленной методики.

4. Лично автором выполнены расчеты с применением разработанных математических моделей, произведен анализ полученных результатов и в соответствии с ними сделаны выводы по работе.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует пунктам паспорта специальности ВАК 05.14.01 – «Энергетические системы и комплексы»: пункт 3. «Использование на этапе проектирования и в период эксплуатации методов математического моделирования с целью исследования и оптимизации структуры и параметров энергетических систем и комплексов и происходящих в системах энергетических процессов»; пункт 5. «Разработка и исследование в области энергосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке теплоты и энергоносителей в энергетических системах и комплексах».

Степень достоверности и апробации результатов. Используемые математические модели элементов исследуемых установок основаны на апробированных методах расчета, а получаемые с их применением результаты имеют высокую степень достоверности по причине применения в исследовании ПВК СМПП-ПК, отлаженного за период применения до высокой точности выполняемых расчетов. Математические модели котлоагрегатов идентифицированы на основании данных о реально действующем оборудовании. Математическая модель определения температуры точки росы на основании расчета термодинамического равновесия химических реакций образования серной кислоты верифицирована в ходе исследований на фактически действующем оборудовании.

Публикации. По теме диссертации было опубликовано 10 научно-исследовательских работ, в том числе 2 в изданиях перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 143 источника, и 2 приложений. Работа изложена на 135 страницах текста, содержит 19 рисунков и 11 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, раскрывается степень разработанности выбранной проблематики; определены цели и задачи работы; охарактеризованы методология и методы исследования; выделены элементы

научной новизны и практическая значимость работы; сформулированы положения, выносимые на защиту; отражены сведения об апробации результатов.

В первой главе представлена постановка задачи комплексной технико-экономической оптимизации схем и параметров котлоагрегатов угольных ТЭС при их модернизации с учетом низкотемпературной коррозии по выбранному критерию экономической эффективности; приведена математическая формулировка задачи оптимизации режимных и конструктивных параметров котлоагрегата при его модернизации по критерию минимума суммарных ежегодных затрат, связанных с эксплуатацией и ремонтом установки с учетом ее модернизации; описана методика расчёта суммарных ежегодных затрат и их составляющих; представлен подход к оптимизационным исследования котельных агрегатов при их модернизации.

Особенность оптимизационных расчетов при модернизации действующего энергетического оборудования, в отличие от подобных расчетов для нового оборудования, состоит в том, что при модернизации часть существующих элементов и соединяющих их связей сохраняется, часть же элементов и связей убираются и появляются новые элементы и соответствующие связи. Оптимизации же подлежат конструктивные параметры только новых элементов. Что касается оптимизируемых режимных параметров, то оптимизации подлежат параметры, относящиеся ко всем элементам, как новым, так и старым. Так же должны учитываться все ограничения, относящиеся как к новым, так и к старым элементам. При модернизации должны учитываться капиталовложения только в новые элементы, поскольку капиталовложения в существующие элементы уже сделаны и они одинаковы для всех вариантов. Применительно к рассматриваемым в диссертационной работе вариантам модернизации фактически действующей котельной установки задача оптимизации параметров как задача нелинейного математического программирования имеет следующий вид:

$$\min_{x_i^P, x_i^M} Z_i(x_i^P, x_i^K, x_i^M, y_i), \quad (1)$$

при условиях:

$$H_i(x_i^K, x_i^M, y_i) = 0, \quad (2)$$

$$G_i(x_i^K, x_i^M, y_i) \geq 0, \quad (3)$$

$$x_{\min_i}^P \leq x_i^P \leq x_{\max_i}^P, \quad (4)$$

$$x_{\min_i}^M \leq x_i^M \leq x_{\max_i}^M, \quad (5)$$

$$i = 1, \dots, I;$$

где I – число вариантов модернизации котельного агрегата; Z_i – суммарные ежегодные затраты, связанные с эксплуатацией варианта модернизации котельной установки; x_i^P – вектор независимых оптимизируемых параметров (входные расчетные параметры, определяющие режим работы котлоагрегата); x_i^K – вектор конструктивных параметров, не меняющихся в ходе модернизации; x_i^M – вектор оптимизируемых конструктивных параметров, изменяющихся при модернизации котлоагрегата; y_i – вектор зависимых вычисляемых параметров; H_i – вектор ограничений-равенств (уравнения материального, энергетического балансов, теплопередачи и др.); G_i – вектор ограничений-неравенств (ограничения на соблюдение технологических требований к работе котлоагрегата); $x_{\min_i}^P, x_{\max_i}^P$ –

векторы граничных значений оптимизируемых параметров, определяющих режим работы котлоагрегата; $x_{\min_i}^M$, $x_{\max_i}^M$ – векторы граничных значений оптимизируемых конструктивных параметров, меняющихся в ходе модернизации.

С целью оценки экономической эффективности рассматриваемых в работе вариантов модернизации котельной установки, сжигающей высокосернистый уголь, за основу принята методика, разработанная в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, позволяющая наиболее полно учесть последствия от их внедрения по всем элементам котлоагрегата. Данная методика доработана и учитывает также скорость низкотемпературной коррозии, изменение мощности тягодутьевых агрегатов, затраты, связанные с установкой, эксплуатацией и ремонтом дополнительных элементов модернизированной установки.

Суммарные ежегодные затраты, связанные с эксплуатацией и ремонтом котельного агрегата при его модернизации могут быть представлены в следующем виде:

$$Z = U^{\text{топл.}} + U^{\text{т.скл.}} + U^{\text{р.скл.}} + U^{\text{р.кот.}} + U^{\text{з.улав.}} + U^{\text{р.з.улав.}} + U^{\text{з.удал.}} + U^{\text{р.з.удал.}} + U^{\text{з.хр.}} + U^{\text{з.выбр.}} + U^{\text{SO}_2 \text{выбр.}} + U^{\text{доп.}} \quad (6)$$

где $U^{\text{топл.}}$ – затраты на покупку и перевозку топлива, руб.; $U^{\text{т.скл.}}$ – затраты на разгрузку, складирование и подачу топлива, руб.; $U^{\text{р.скл.}}$ – затраты на ремонт систем разгрузки, складирования и подачи топлива, руб.; $U^{\text{р.кот.}}$ – затраты на ремонт основного и вспомогательного котельного оборудования, руб.; $U^{\text{з.улав.}}$ – затраты на золоулавливание, руб.; $U^{\text{р.з.улав.}}$ – затраты на ремонт систем золоулавливания, руб.; $U^{\text{з.уд.}}$ – затраты на золошлакоудаление, руб.; $U^{\text{р.з.уд.}}$ – затраты на ремонт систем золошлакоудаления, руб.; $U^{\text{з.хр.}}$ – затраты на хранение золы и шлака, руб.; $U^{\text{з.выбр.}}$ – плата за выбросы золы, руб.; $U^{\text{SO}_2 \text{выбр.}}$ – плата за выбросы SO_2 , руб.; $U^{\text{доп.}}$ – дополнительные затраты, связанные непосредственно с модернизацией котельной установки, руб.

В состав дополнительных затрат, связанных с технической стороной реализации вариантов модернизации, входят затраты, связанные с изменением мощности тягодутьевых агрегатов и капиталовложения в дополнительные тягодутьевые мощности и в дополнительные теплообменные поверхности.

Суммарные затраты определяются на основании удельных стоимостей, что позволяет учитывать режимы работы установки.

Описанные в первой главе положения позволили сформулировать подход к проведению оптимизационных исследований котельных агрегатов угольных ТЭС при их модернизации с учетом низкотемпературной коррозии конвективных поверхностей нагрева при сжигании высокосернистых углей, представленный на рисунке 1.

Во второй главе приведен анализ существующих подходов к снижению низкотемпературной коррозии воздухоподогревателей котлоагрегатов, сжигающих высокосернистые угли. Выполнен обзор и анализ способов предварительного подогрева воздуха перед воздухоподогревателем котлоагрегата как вариантов модернизации, позволяющих предотвратить развитие низкотемпературной коррозии на конвективных поверхностях теплообмена.

Исходя из характера процесса низкотемпературной коррозии, различают несколько способов снижения ее влияния на работу оборудования: переход на сжигание менее сернистого топлива – менее сернистого угля или природного газа; предварительная подготовка топлива (методами физического и химического обессеривания); связывание входящих в состав дымовых газов соединений серы активными компонентами в объеме топки и конвективного газохода котлоагрегата; изменение способа сжигания топлива (сжигание

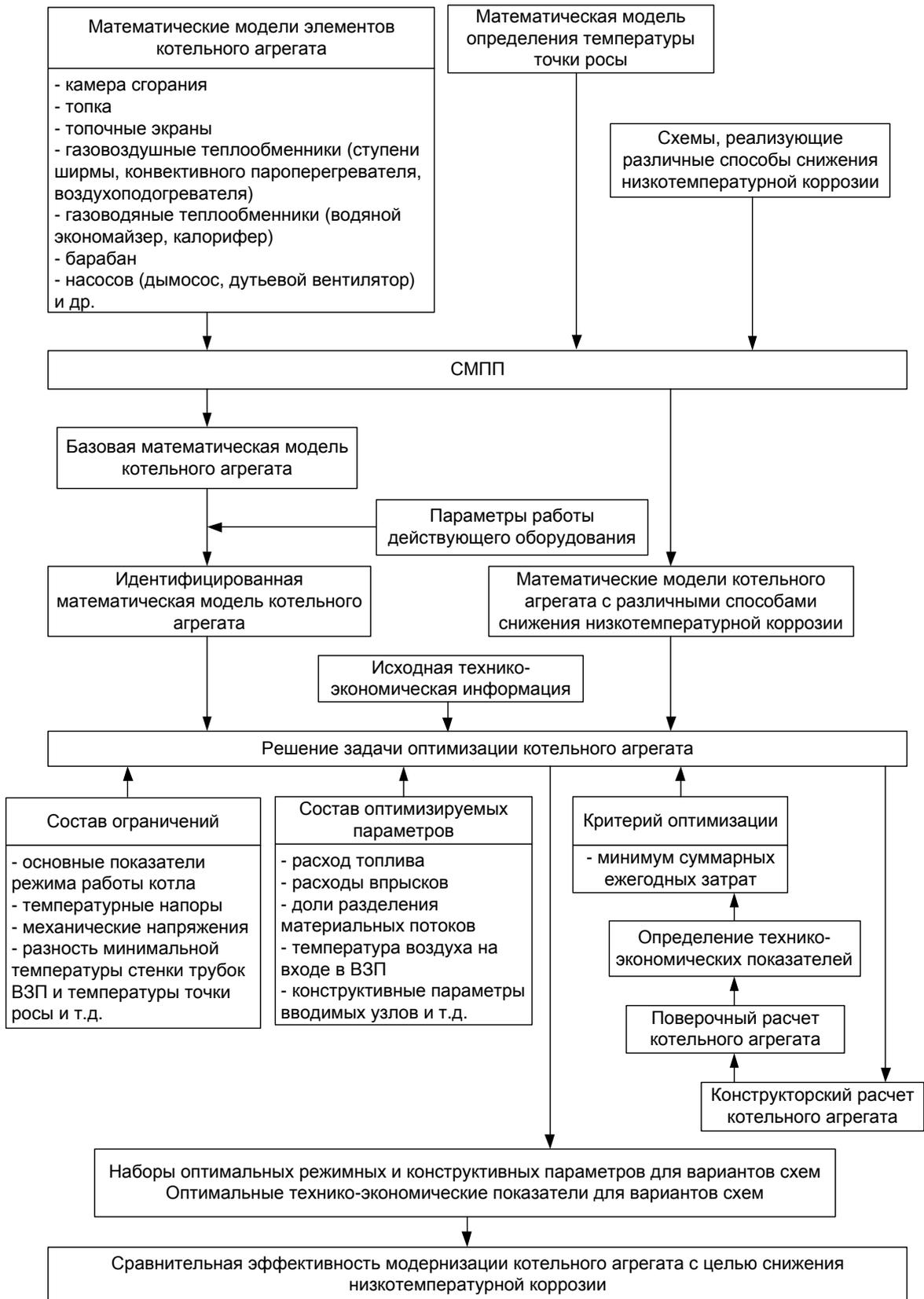


Рисунок 1 – Блок-схема методического подхода к решению задачи комплексных оптимизационных технико-экономических исследований при модернизации котельного агрегата с целью снижения низкотемпературной коррозии

угля в кипящем слое, циркулирующем кипящем слое, многоступенчатое сжигание угля); выполнение конвективных поверхностей нагрева котлоагрегата из коррозионностойких материалов; повышение минимальной температуры стенки подверженных коррозии поверхностей.

Входящие в последнее из представленных направлений методы отличаются универсальностью, отсутствием необходимости в глубокой реконструкции оборудования, отсутствием ограничений по мощности единичного агрегата и осуществляются за счет предварительного подогрева воздуха перед воздухоподогревателем котлоагрегата.

В настоящее время разработаны и применяются различные способы предварительного подогрева воздуха, отличающиеся по типу теплоносителя, по аэродинамической схеме (замкнутая, разомкнутая, одно- и двухступенчатая и т.д.), по конструкции и компоновке устройств, используемых для подогрева воздуха, и т.д.. Основным же признаком, определяющим тепловую схему установки, является вид используемого в схеме греющего агента. По этому признаку способы подогрева можно разделить на следующие группы:

- подогрев теплотой продуктов сгорания топлива;
- подогрев теплотой отборного пара турбины;
- паровой подогрев в сочетании с изменением соотношения водяных эквивалентов газов и воздуха в воздухоподогревателе;
- подогрев воздуха от посторонних источников;
- комбинированные схемы подогрева.

Общая классификация применяемых способов непрямого подогрева воздуха приведена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Классификация способов непрямого подогрева воздуха для котлоагрегатов ТЭС

Анализ особенностей методов непрямого подогрева воздуха, находящихся на стадиях разработки и эксплуатации, позволил выбрать несколько наиболее доступных и универсальных способов предварительного подогрева воздуха перед воздухоподогревателем котлоагрегата с целью проведения дальнейших оптимизационных исследований возможности модернизации котельной установки с учетом низкотемпературной коррозии. Описание выбранных способов предварительного подогрева воздуха приведено в главе 4.

В третьей главе представлена методика определения температуры точки росы дымовых газов на основании расчета термодинамического равновесия химических процессов образования серной кислоты с определением фазового состава газовой смеси.

Необходимость определения температуры точки росы объясняется ключевым влиянием данного параметра на результаты исследований, поскольку оптимизация вариантов реконструкции котлоагрегата проводится с условием повышения минимальной температуры стенок трубок воздухоподогревателя до значения, выше температуры конденсации паров серной кислоты. При проведении комплексных оптимизационных исследований при модернизации котлоагрегата в рамках поставленной задачи важным является учет влияния изменения схемы установки и параметров ее работы на температуру точки росы дымовых газов, чего существующие аналитические подходы не обеспечивают.

В данной работе используется метод расчета температуры точки росы дымовых газов на основании условий термодинамического равновесия химических процессов преобразования соединений, входящих в состав дымовых газов и термодинамического равновесия многокомпонентной многофазной системы, которой дымовые газы являются.

Моделирование химических процессов преобразования основано на соотношениях равновесной термодинамики.

На первом этапе решается задача нахождения термодинамического равновесия химических реакций образования серной кислоты при заданных температурах и давлениях. В этом случае применяется расчет функции Гиббса для идеального газа. Такое упрощение повышает вычислительную скорость итерационного процесса.

Термодинамическое описание протекающих процессов включает, в первую очередь, уравнения материальных балансов для каждого химического элемента дымовых газов:

$$\delta_i^M = \sum_{l=1}^L K_{li} \cdot q_l' - \sum_{j=1}^J K_{ji} \cdot q_j'' = 0, \quad (7)$$

$$i = 1, \dots, I,$$

где q_l' – мольный расход l -го компонента газовой смеси до реакции преобразования; L – число компонентов газовой смеси до реакции; I – число химических элементов, участвующих в реакции; q_j'' – мольный расход j -го компонента газовой смеси после реакции; J – число компонентов газовой смеси после реакции; K_{li} – число молей i -го химического элемента, содержащихся в одном моле l -го компонента до реакции; K_{ji} – число молей i -го химического элемента, содержащихся в одном моле j -го компонента смеси после реакции; T'' – температура газовой смеси после реакции; P'' – давление газовой смеси после реакции.

В точке термодинамического равновесия протекающих реакций должен достигаться минимум функции Гиббса, который зависит от температуры, давления и мольного содержания компонентов в дымовых газах. Математическая формулировка задачи минимизации функции Гиббса имеет вид:

$$\min G(T'', P'', q_1'', \dots, q_J''), \quad (8)$$

$$\delta_i^M = 0, \quad (9)$$

$$i = 1, \dots, I.$$

Задача поиска минимума функции многих переменных при соблюдении ограничений в форме равенств сводится к поиску стационарной точки функции Лагранжа. Система уравнений, определяющих стационарную точку этой функции применительно к задаче минимизации функции Гиббса примет вид:

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = \frac{\partial L}{\partial q_j''} = \frac{\partial G}{\partial q_j''} - \sum_{i=1}^I \lambda_i \cdot K_{ji} = 0, \quad (10)$$

$$j = 1, \dots, J,$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = \delta_i^M = \sum_{l=1}^L K_{li} \cdot q_l' - \sum_{j=1}^J K_{ji} \cdot q_j'' = 0, \quad (11)$$

$$i = 1, \dots, I.$$

где x_i – n -мерный вектор оптимизируемых параметров; λ_j – множитель Лагранжа, относящийся к ограничению-равенству.

Введем обобщенный $(I + J)$ -мерный вектор Z , такой, что

$$Z = \begin{pmatrix} q_I'' \\ \dots \\ q_J'' \\ \lambda_1 \\ \dots \\ \lambda_I \end{pmatrix}, \quad (12)$$

и обобщенную векторную $(I + J)$ -мерную функцию $\delta Z(q_I'', \dots, q_J'', \lambda_1, \dots, \lambda_I) = \delta Z(Z)$ вида

$$\delta Z = \begin{pmatrix} \frac{\partial L}{\partial q_I''} \\ \dots \\ \frac{\partial L}{\partial q_J''} \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_1} \\ \dots \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_I} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Тогда условия (10), (11) можно записать, как

$$\delta Z(Z) = 0. \quad (14)$$

Итерационный метод Ньютона оказался наиболее эффективным для решения системы уравнений (14). Следующее рекуррентное соотношение определяет каждую итерацию этого метода:

$$Z^t = Z^{t-1} + y^t \cdot \left\{ \frac{\partial(\delta Z(Z^{t-1}))}{\partial Z} \right\}^{-1} \cdot \delta Z(Z^{t-1}), \quad (15)$$

где t – номер итерации;

$$\left\{ \frac{\partial(\delta Z(Z^{t-1}))}{\partial Z} \right\}$$

– матрица частных производных векторной функции (10), определенная в точке Z^{t-1} ; y^t – $(J+I)$ -мерный вектор шагов.

Первые J компонентов вектора Z (т.е. молярные расходы компонентов газовой смеси после реакции) не могут быть отрицательными, поэтому выбор компонентов вектора y^t проводится таким образом, чтобы первые компоненты вектора Z всегда были положительными, хотя и могли стремиться к нулю при стремлении числа итераций t к бесконечности. Для определения y^t применяются правила:

1. $y_i^t = y$, если $i > J$, где $0 < y \leq 1$;

2. $y_i^t = y$, если $i \leq J$ и i -й компонент вектора Θ , $\Theta_i \geq 0$, где

$$\Theta = Z^{t-1} + y \cdot \left\{ \frac{\partial(\delta Z(Z^{t-1}))}{\partial Z} \right\}^{-1} \cdot \delta Z(Z^{t-1}), \quad (16)$$

$$y^t = -\frac{Z_i^{t-1}}{2 \cdot (\Theta_i - Z_i^{t-1})}, \text{ если } \Theta_i < 0. \quad (17)$$

При таком выборе компонент ни один мольный расход не будет отрицательным. В случае, если некоторый компонент вектора Θ , Θ_i , $i \leq J$, будет отрицательным, то шаг y_i подбирается таким образом, чтобы выполнялось условие

$$Z_i^t = \frac{Z_i^{t-1}}{2}. \quad (18)$$

Результатом решения задачи (8) – (18) является количественное содержание серной кислоты в составе продуктов сгорания.

На втором этапе на основании методики, разработанной в ИСЭМ СО РАН (Клер А.М., Тюрина Э.А., Степанов В.В.) и модифицированной для условий рассматриваемой задачи, определяется фазовое состояние компонентов дымовых газов на основе термодинамического равновесия многокомпонентной парожидкостной смеси, поскольку отдельные вещества, входящие в их состав, при идентичных параметрах потока могут находиться в различных фазовых состояниях.

Температура, при которой в равновесном состоянии появляется жидкая фаза раствора серной кислоты, принимается за искомую температуру точки росы дымовых газов.

Необходимо отметить ряд упрощений, содержащихся в представленной модели – рассматриваются идеальные процессы; жидкая фаза раствора серной кислоты рассматривается как идеальный раствор; не учитывается энтропия смешения компонентов; не учитываются сорбция паров и прочие поверхностные эффекты при конденсации серной кислоты; в качестве компонентов, входящих в состав дымовых газов, рассматриваются продукты полного сгорания угля – азот (N_2), кислород (O_2), углекислый газ (CO_2), водяной пар (H_2O), сернистый и серный ангидриды (SO_2 , SO_3).

Определение равновесного состава газовой смеси представляет собой итерационный процесс, состоящий также из двух этапов. На каждом уровне также решаются задачи одномерной минимизации функции Гиббса:

$$\min_{q^g \in Q^{cr} \cup Q^{sat}} G(q^g, T, P), \quad (19)$$

$$q_i^m = q_i^g + q_i^l, \quad (20)$$

$$q_i^g \geq 0, q_i^l \geq 0, \quad (21)$$

$$i=1, \dots, n,$$

где q^g – вектор, описывающий расходы компонентов смеси в газовой фазе; q_i^g , q_i^l , q_i^m – расход i -го компонента смеси в газовой фазе, жидкой фазе, и, соответственно, суммарный; T , P – температура и давление дымовых газов; n – число компонентов, входящих в состав дымовых газов.

При этом $q^g \in Q^{cr}$ если для всех компонентов, для которых $T > T_i^{cr}$, имеет место равенство $q_i^g = q_i^m$, $q_i^l = 0$, и $q^g \in Q^{sat}$, если для всех компонентов, для которых $T > T_i^{sat}$, имеет место равенство $q_i^g = q_i^m$, $q_i^l = 0$. Здесь T_i^{cr} и T_i^{sat} – температура критическая и температура насыщения компонента при давлении смеси.

Функция Гиббса системы может быть представлена как сумма функций Гиббса для отдельных компонентов системы:

$$G = \sum_{i=1,n} G_i,$$

$$G_i = H_i^g(T, P_i) \cdot q_i^g + H_i^l(T, P) \cdot q_i^l - T(S_i^g(T, P_i) \cdot q_i^g + S_i^l(T, P) \cdot q_i^l), \quad (22)$$

где P_i – парциальное давление i -ого компонента; H_i^g, H_i^l – энтальпии i -ого компонента смеси в газовой и жидкой фазах; S_i^g, S_i^l – энтропии i -ого компонента смеси в газовой и жидкой фазах соответственно.

Таким образом, с учётом (20) и (21) получаем выражение для G_i :

$$G_i = H_i^g(T, P_i) \cdot q_i^g + (q_i^m - q_i^g) \cdot H_i^l(T, P) - T(S_i^g(T, P_i) \cdot q_i^g + S_i^l(T, P) \cdot (q_i^m - q_i^g)), \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^n (q_j^g / \mu_j) = v_{\Sigma}^g, \quad (24)$$

где v_{Σ}^g – суммарное количество вещества, присутствующих в системе в газовой фазе; μ_i – молекулярная масса i -ого компонента.

Если бы v_{Σ}^g было заранее известно, то решение описанной экстремальной n -мерной задачи распадалось бы на решение n независимых одномерных экстремальных задач вида

$$\min_{q_i^g \in Q^{cr} \cup Q^{sat}} \bar{G}_i \quad (25)$$

при условиях

$$P_i = \frac{q_i^g / \mu_i}{v_{\Sigma}^g} \cdot P, \quad (26)$$

$$q_i^m \geq q_i^g \geq 0. \quad (27)$$

Пусть при решении n задач (23) – (25) с v_{Σ}^g , равном \tilde{v}_{Σ}^g , выполняется следующее условие:

$$\tilde{v}_{\Sigma}^g = \sum_{j=1}^n (\tilde{q}_j^g / \mu_j), \quad (28)$$

где \tilde{q}_j^g – решение j -ой задачи (23) – (25).

В таком случае \tilde{q}_j^g является также решением исходной задачи (19) – (22).

Описанные положения дают возможность реализовать двухуровневый алгоритм решения исходной задачи (19) – (22). На первом уровне ищется v_{Σ}^g , которое отвечает условию (24), а на втором уровне для каждого из рассматриваемых значений v_{Σ}^g решаются задачи (23) – (25).

Обозначим q_j^g , которое является результатом решения j -ой одномерной задачи (23) – (25) при заданном v_{Σ}^g , через $q_j^g(v_{\Sigma}^g)$. На каждом шаге верхнего уровня решения задачи (19) – (22) определяется невязка

$$\delta(v_{\Sigma}^g) = \sum_{j=1}^n q_j^g(v_{\Sigma}^g) / \mu_j - \tilde{v}_{\Sigma}^g. \quad (29)$$

Анализ этой невязки позволяет сравнить заданное значение v_{Σ}^g с искомым решением \tilde{v}_{Σ}^g – если $\delta > 0$, то $v_{\Sigma}^g < \tilde{v}_{\Sigma}^g$, а если $\delta < 0$, то $v_{\Sigma}^g > \tilde{v}_{\Sigma}^g$.

Применение на верхнем уровне алгоритма – для поиска точки с нулевым значением невязки – метода половинного деления в сочетании с методом хорд позволяет обеспечить устойчивость и хорошую сходимость процесса поиска \tilde{v}_{Σ}^g . Для поиска минимума функции Гиббса \overline{G}_i также применяется метод половинного деления в сочетании с методом хорд.

В результате решения задачи (22) – (29) определяется наличие или отсутствие конденсированных паров серной кислоты. Далее определяется невязка по наличию жидкой фазы серной кислоты на двух соседних итерациях. На основании анализа невязки изменяется начальная температура для определения термодинамического равновесия химических реакций. В этом случае также применяется метод половинного деления в сочетании с методом хорд. Если невязка на двух соседних итерациях удовлетворяет заданную точность, процесс расчета заканчивается.

Четвёртая глава посвящена непосредственно оптимизационным расчетам. В данном разделе представлены разработанные математические модели котлоагрегатов БКЗ-75-39ФБ, с применением которой выполнялась верификация математической модели определения температуры точки росы на основании расчета термодинамического равновесия, и БКЗ-420-140, исследование возможности модернизации которого с учетом низкотемпературной коррозии является целью проведения оптимизационных расчетов. Также в разделе приводятся исходные данные для проведения оптимизационных расчетов вариантов модернизации котлоагрегата БКЗ 420-140, результаты расчетов и их анализ.

Математическая модель определения температуры точки росы, основанная на представленной в работе методике, была верифицирована в ходе проведения исследований с применением математической модели котлоагрегата БКЗ-75-39ФБ. Исследования были направлены на изучение возможности использования отходов углеобогащения в качестве топливной добавки и определения эффективности связывания оксидов серы дымовых газов добавлением в состав топлива связывающего компонента (мраморной крошки), с определением эффективности утилизации низкокачественного дешевого топлива в смеси с проектным углем с одновременным снижением выбросов оксидов серы путем их связывания в дымовых газах активным веществом. Данное исследование проводилось на базе одной из ТЭЦ, входящих в состав ПАО «Иркутскэнерго».

С целью комплексной оценки возможности внедрения данного технического решения автором была разработана математическая модель котлоагрегата БКЗ-75-39ФБ, на основании которого осуществлялось опытное сжигание смеси базового топлива – черемховского угля – с отходами углеобогащения. Расчетная схема котлоагрегата представлена на рисунке 3. Математическая модель котлоагрегата настроена в соответствии с экспериментальными данными, полученными в результате опытного сжигания.

Математическая модель дополнена расчетом абразивного износа конвективных поверхностей нагрева, расчетом доли оксидов серы, связываемых летучей золой топлива и серосвязывающим компонентом, расчетом скорости низкотемпературной коррозии ВЗП котлоагрегата.

Доля связываемых летучей золой и активным компонентом оксидов серы определяется в зависимости от мольного отношения активного компонента к сере исходного топлива.

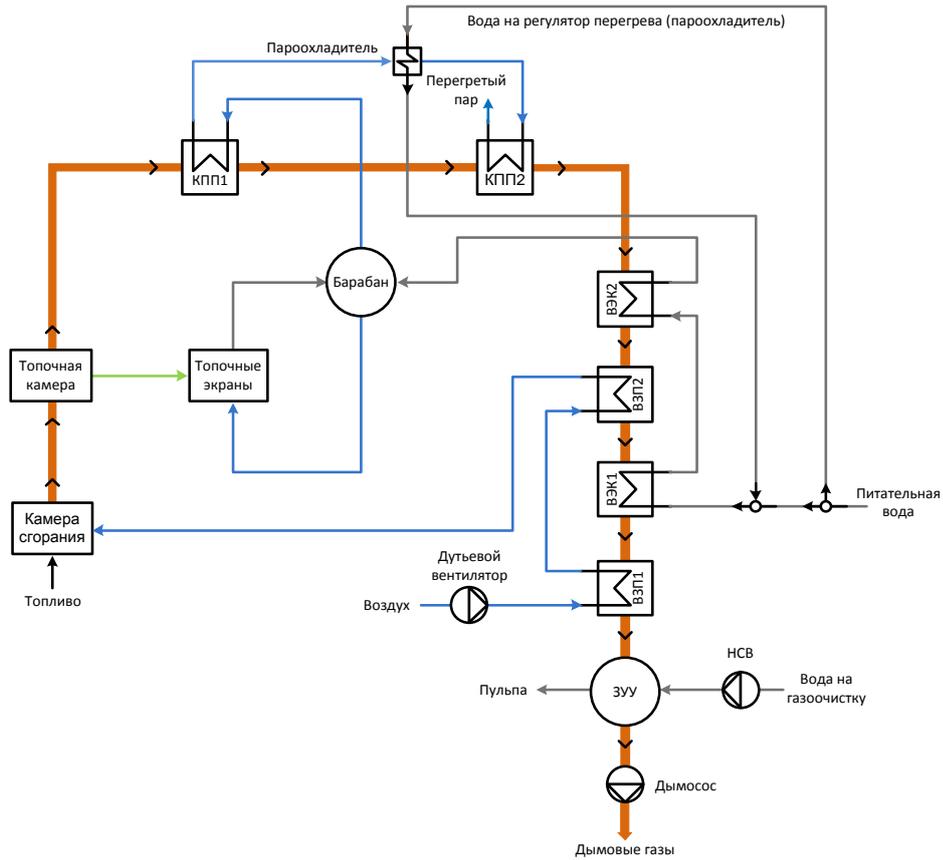


Рисунок 3 – Расчетная схема котла БКЗ-75-39ФБ

Расчет скорости низкотемпературной коррозии производится на основании аппроксимационных зависимостей (рисунок 4), отражающих усредненную характеристику приведенных в литературе закономерностей и построенных с использованием экспериментальных данных.

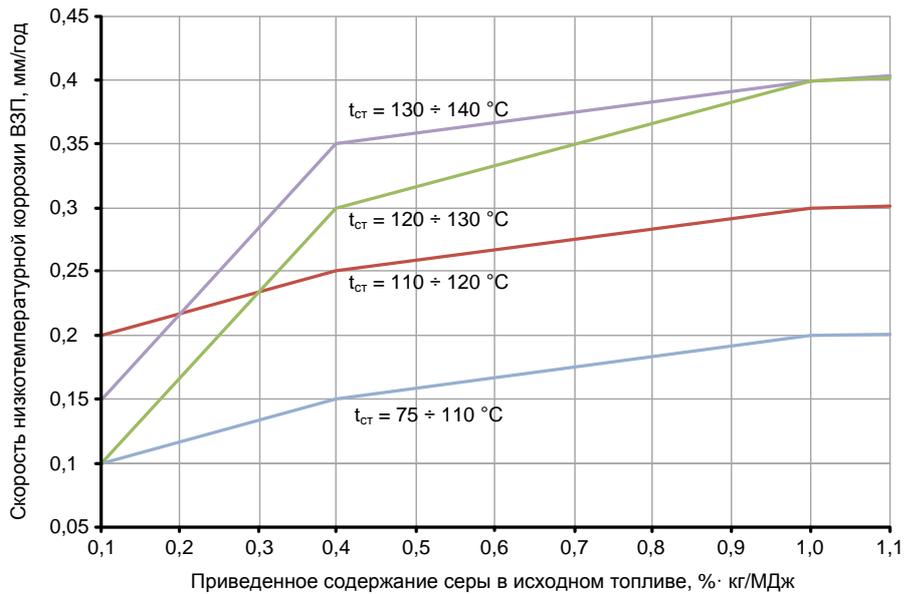


Рисунок 4– Зависимость скорости низкотемпературной коррозии ВЗП от приведенного содержания серы в исходном топливе для различной температуры металла

В таблице 1 представлен состав исходного топлива – черемховского угля с повышенным содержанием серы.

Таблица 1 – Состав черемховского угля

W^r , %	A^r , %	$S^r_{к+оп}$, %	C^r , %	H^r , %	N^r , %	O^r , %	V^{daf} , %	$Q^r_{в}$, кДж/кг
15,0	29,8	2,0	42,5	3,1	0,6	8,1	47,0	20110,0

В таблице 2 приведен состав отходов углеобогащения, усредненный по данным 7-и проб.

Таблица 2 – Характеристика отходов углеобогащения

W^r , %	A^r , %	$S^r_{к+оп}$, %	V^{daf} , %	$Q^r_{в}$, кДж/кг	$Q^s_{д}$, кДж/кг
23,6	28,1	0,72	49,3	12537,07	17949,57

В таблице 3 приведен состав отходов мраморного производства – мраморной крошки, использовавшихся в качестве серосвязывающего компонента.

Таблица 3 – Состав мраморной крошки, %

CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	SrO	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O
59,23	22,49	17,4	0,487	0,115	0,096	0,073	0,067	0,029	0,012	0,007

В таблице 4 представлены основные показатели работы котлоагрегата БКЗ-75-39ФБ в номинальном режиме при сжигании топлив различного состава, рассчитанные с применением разработанной математической модели.

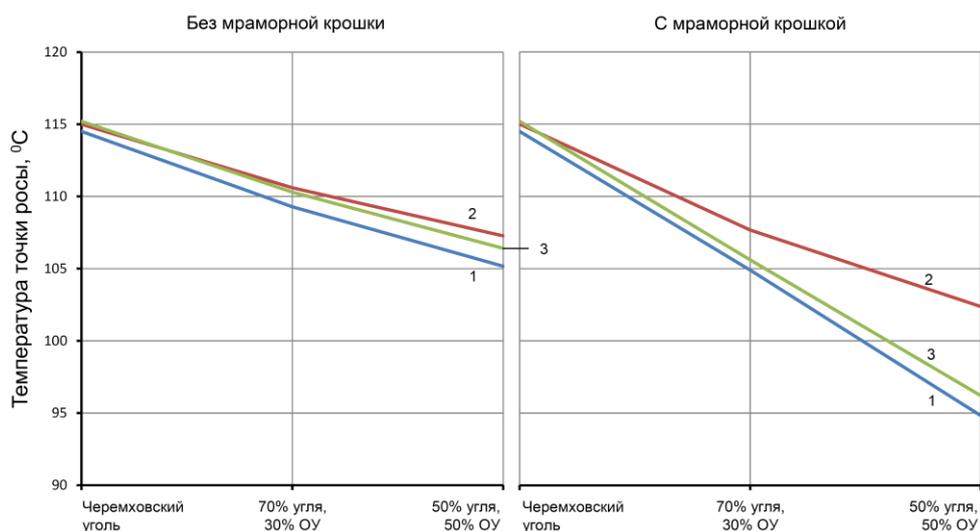
Таблица 4 – Расчетные показатели работы котлоагрегата БКЗ-75-39ФБ

Наименование параметра	Ед. изм.	Базовое топливо	Без мраморной крошки		С мраморной крошкой	
			30 % гранул	50 % гранул	30 % гранул	50 % гранул
1	2	3	4	5	6	7
Паропроизводительность	т/час	75	75	75	75	75
Давление перегретого пара	кгс/см ²	38,72	38,7	38,68	38,71	38,71
Температура перегретого пара	°С	438,1	443,67	447,68	440,05	441,45
Давление питательной воды	кгс/см ²	60	60	60	60	60
Температура питательной воды	°С	105,34	105,41	105,47	105,35	105,37

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7
Температура уходящих газов	°С	128,85	130,84	132,42	130,46	131,82
Расчетный $\eta_{ка}^{бр}$	%	90,531	90,407	90,313	90,306	90,14
Расход топлива	кг/с	4,028	4,2891	4,4824	4,4158	4,7177
SO ₂ в дымовых газах ($\alpha=1,4$; O ₂ =6 %)	мг/м ³	1429,4	1128,1	892,3	1107,2	738,2
Коэффициент связывания SO _x , η_{SOx}	-	-	0,024	0,0735	0,07	0,2689
Расход золы на выходе из камеры сгорания	кг/с	1,14	1,197	1,241	1,364	1,552
Температура точки росы: опыт	°С	114,5	109,28	105,16	104,94	94,82
расчет по нормативному методу	°С	115	110,6	107,2	107,7	102,4
расчет по представленной методике	°С	115,2	110,3	106,4	105,6	96,2
Расчетная скорость низкотемпературной коррозии ВЗП 1-й ступени	мм/год	0,1624	0,1532	0,146	0,1467	0,1121

На рисунке 5 наглядно представлено распределение значений температуры точки росы дымовых газов для различных составов сжигаемого топлива, полученных различными способами. Результаты показывают близость значений температуры точки росы, определенной экспериментально, со значениями, вычисленным с применением математической модели, основанной на представленной в работе методике (погрешность не превышает 2 %).



1 – опытное сжигание; 2 – расчет по нормативному методу; 3 – расчет по представленной методике

Рисунок 5 – Значения температуры точки росы для различных составов топлива

На основании представленных результатов сделан вывод о том, что расчет температуры точки росы дымовых газов на основании предлагаемой в работе методики позволяет с допустимой погрешностью получить значения данного параметра, близкие к фактическим. При этом учет в расчете большинства основных факторов, в действительности влияющих на температуру точки росы, предполагает адекватное изменение рассчитываемого значения при проведении оптимизационных исследований вариантов модернизации котельной установки.

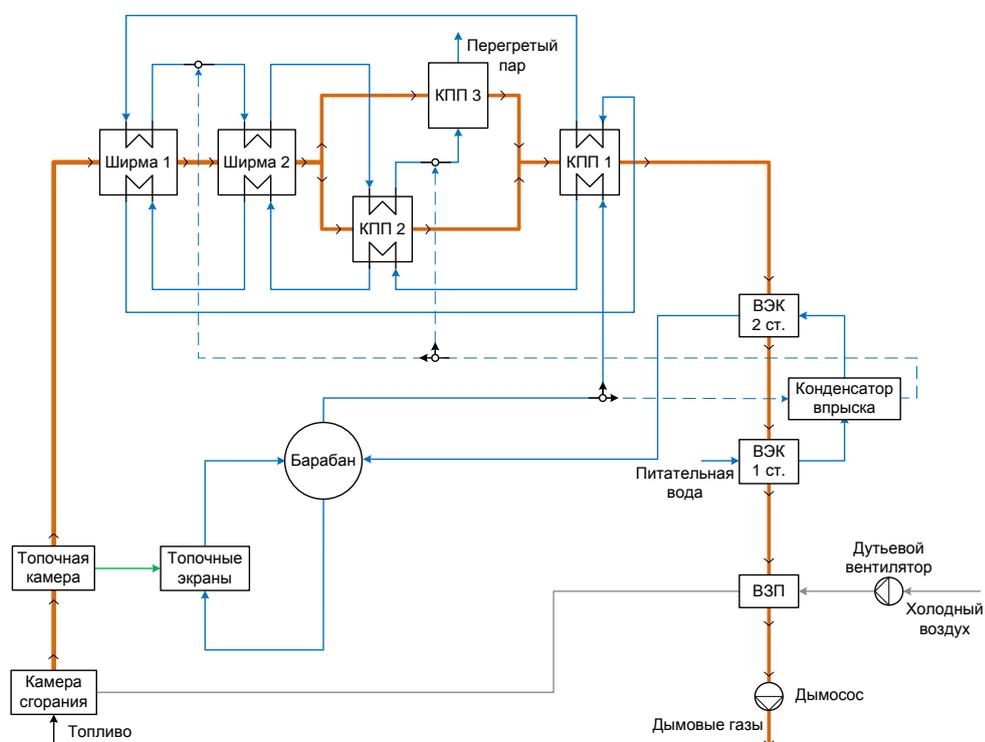


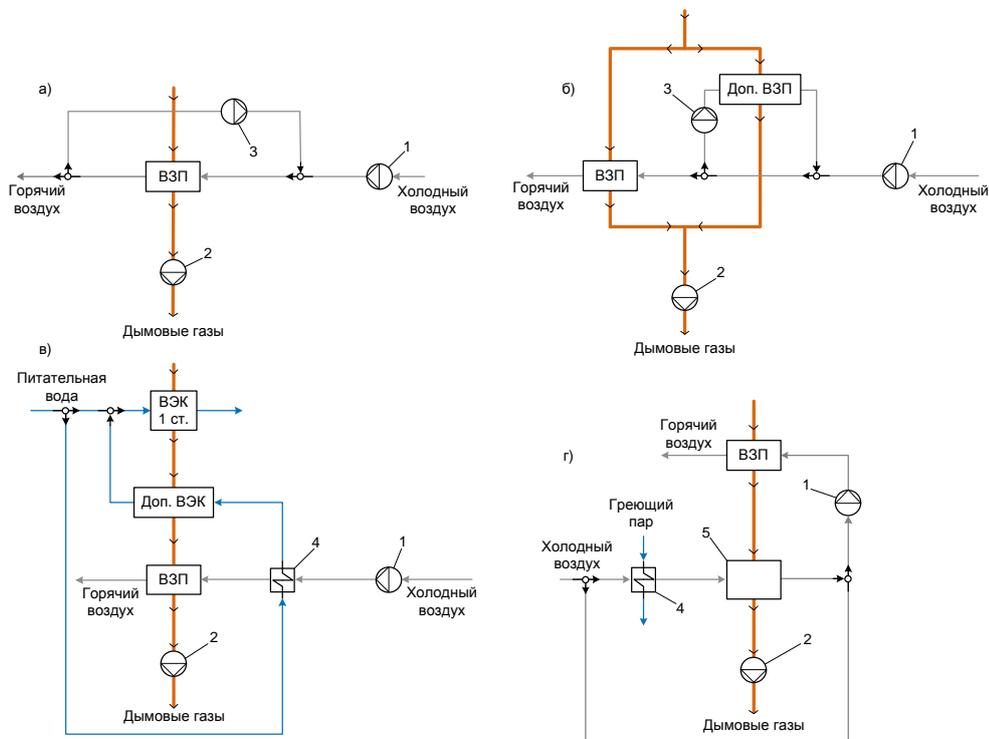
Рисунок 6 – Расчетная схема котлоагрегата БКЗ-420-140

Следующим этапом стало проведение оптимизационных исследований способов предварительного подогрева воздуха перед ВЗП котлоагрегата в качестве метода снижения влияния низкотемпературной коррозии.

С целью оценки возможности использования различных способов предварительного подогрева воздуха в рамках задачи снижения влияния низкотемпературной коррозии на работу котлоагрегата предлагается рассмотреть наиболее характерные, наименее затратные, не требующие глубокой реконструкции оборудования варианты схем. С этой целью была разработана математическая модель котлоагрегата БКЗ-420-140. На рисунке 6 приведена базовая расчетная схема котлоагрегата.

Математическая модель котлоагрегата БКЗ-420-140 также дополнена расчетом температуры точки росы на основании термодинамического равновесия протекающих химических реакций образования серной кислоты, расчетом скорости низкотемпературной коррозии и расчетом скорости абразивного износа конвективных поверхностей котлоагрегата.

Для математического моделирования с целью последующей технико-экономической оценки в рамках поставленной задачи из группы методов, основанных на подогреве воздуха теплотой продуктов сгорания топлива, выбраны две типовые схемы – схема рециркуляции горячего воздуха (рисунок 7, а) и схема с рециркуляцией слабонагретого воздуха (рисунок 7, б).



1 – дутьевой вентилятор; 2 – дымосос; 3 – вентилятор рециркуляции воздуха;
4 - калорифер; 5 – каскадная ступень воздухоподогревателя
Рисунок 7 – Рециркуляция горячего воздуха

На рисунке 7, в представлена схема предварительного подогрева воздуха питательной водой, выбранная для исследования как наиболее эффективная с точки зрения использования тепла внутри цикла.

Среди комбинированных схем предварительного подогрева воздуха интересной представляется схема с каскадным трубчатым воздухоподогревателем (рисунок 7, г).

Оптимизационные расчеты каждого варианта можно выполнялись на несколько режимов работы котлоагрегата – номинальный режим, продолжительностью 5000 часов в год, режим средней нагрузки ($\approx 75\%$ от $D_{ном}$), продолжительностью 2000 часов в год, и режим минимальной нагрузки ($\approx 50\%$ от $D_{ном}$), продолжительностью 1000 часов в год.

Результатом такой серии расчетов каждого из вариантов схем является сочетание набора конструктивных и режимных параметров модернизированной установки, оптимальных по выбранному критерию экономической эффективности – минимуму суммарных ежегодных затрат на эксплуатацию котельного агрегата. Важным условием для каждого из вариантов модернизации является увеличение минимальной температуры стенки ВЗП посредством предварительного подогрева воздуха до значения выше температуры точки росы дымовых газов.

Основным топливом в расчете также является черемховский уголь с увеличенным до 2 % содержанием серы.

В таблице 5 представлены исходные данные для определения суммарных ежегодных затрат.

Таблица 5 – Исходная технико-экономическая информация

Показатель	Ед. изм.	Значение	
1	2	3	
Стоимость черемховского угля	руб./т	917,5	
Удельные затраты на разгрузку, складирование и подачу твердого топлива	руб./ т у.т.	503,134	
Удельные затраты на ремонт систем разгрузки, складирования и подачи твердого топлива	руб./ т у.т.	115,48	
Стоимость изготовления и замены бил мельницы	руб.	33653	
Стоимость изготовления и замены билодержателей мельницы	руб.	36056	
Стоимость изготовления и замены брони мельницы	руб.	21033	
Удельная стоимость изготовления и замены водяного экономайзера	руб./м ²	3348,7	
Удельная стоимость изготовления и замены воздухоподогревателя	руб./м ²	342,27	
Удельные затраты на золоулавливание	руб./т золы	130	
Удельные затраты на ремонт систем золоулавливания	руб./т золы	98661	
Удельные затраты на гидрозолоудаление	руб./т шлама	13	
Удельные затраты на ремонт систем гидрозолоудаления	руб./т шлама	120	
Удельные затраты на хранение золы и шлака	руб./т шлама	50	
Удельная плата за выбросы золы:	соблюдение ПДВ	руб./т золы	546
	превышение ПДВ, соблюдение ВСВ	руб./т золы	2730
	превышение ВСВ	руб./т золы	13650
Удельная плата за выбросы SO _x :	соблюдение ПДВ	руб./т SO _x	111,48
	превышение ПДВ, соблюдение ВСВ	руб./т SO _x	557,42
	превышение ВСВ	руб./т SO _x	2787,1
Стоимость электроэнергии собственных нужд	руб./кВт·ч	1,5	
Удельная стоимость изготовления и установки калорифера	руб./м ²	10000	
Удельная стоимость дополнительных тягодутьевых установок	руб./кВт	18000	
Ставка дисконтирования	–	0,08	

Значения основных показателей работы котлоагрегата, полученные в результате оптимизационных расчетов, представлены в таблице 6, где: D_{on} , P_{on} , t_{on} – расход, давление и температура острого пара; B_n – расход натурального топлива; $KПД_{КА}^{бp}$ – КПД котлоагрегата брутто; доля рециркулирующего / греющего агента – часть рециркулирующего воздуха или часть воды, идущая на предварительный подогрев; $t_{ВЗП}$, $t_{ст.минВЗП}$, $t_{росыВЗП}$ – температура воздуха на входе в ВЗП, минимальная температура стенки трубок ВЗП, температура точки росы дымовых газов, проходящих через поверхность соответственно; $t_{ВЗП_ДОП}$, $t_{ст.минВЗП_ДОП}$, $t_{росыВЗП_ДОП}$ – то же для дополнительной конвективной поверхности; $F_{КАЛ.}$ – площадь поверхности калориферов; $F_{ДОП.}$ – площадь дополнительной конвективной поверхности теплообмена; $N_{ДС}$, $N_{ДВ}$, $N_{РВ}$ – мощности дымососа, дутьевого вентилятора, вентилятора рециркуляции дымовых газов; Z – значение целевой функции – суммарные ежегодные затраты.

Таблица 6 – Показатели работы котлоагрегата БКЗ-420-140 с различными схемами предварительного подогрева воздуха в исследуемых характерных режимах

Параметр		Базовая схема	Оптимизационный расчет			
			Рециркуляция горячего воздуха	Рециркуляция слабонагретого воздуха	Подогрев воздуха питательной водой	КТВП
1	2	3	4	5	6	7
Режим номинальной нагрузки						
$D_{оп}$	т/ч	417,6	417,6	418,6	417,6	421
$P_{оп}$	кгс/см ²	140,6	140,7	141,1	137,9	137,7
$t_{оп}$	°С	542,7	540,2	540,4	540,5	547
$t_{ух.г}$	°С	130,7	164,5	151	167,6	186,9
V_n	кг/с	19,2	19,52	19,44	19,6	19,3
$KПД_{КА}^{бр}$		92,26	90,69	91,04	89,85	92,67
Доля рециркулирующего /греющего агента		-	0,53	0,56	0,48	0,85
$t_{ВЗП}'$	°С	22,6	133,3	134	132,4	126
$t_{ст.минВЗП}$	°С	58,9	140,7	141,3	141,5	149,4
$t_{росыВЗП}$	°С	136,8	136,3	136,8	136,6	136,7
$t_{ВЗП доп}'$	°С	-	-	136,9	-	120
$t_{ст.минВЗП доп}$	°С	-	-	137,1	-	137,3
$t_{росыВЗП доп}$	°С	-	-	136	-	136,3
$F_{КАЛ.}$	м ²	-	-	-	1824,2	2134
$F_{доп.}$	м ²	-	-	8054	850,1	2057
$N_{ДС}$	кВт	2591	2968	2886	2875	3154
$N_{ДВ}$	кВт	385	711	416	389	542
$N_{РВ}$	кВт	-	729	528	-	-
Режим средней нагрузки						
$D_{оп}$	т/ч	315,4	313,2	313,2	314,7	316,4
$P_{оп}$	кгс/см ²	143,8	143,9	144,2	140,5	140,9
$t_{оп}$	°С	554,6	541,7	540	547,8	553
$t_{ух.г}$	°С	119,9	155,5	143,2	156,4	173,5
V_n	кг/с	14,6	14,74	14,64	14,82	14,5
$KПД_{КА}^{бр}$		92,69	90,95	91,34	90,12	93,29
Доля рециркулирующего /греющего агента		-	0,59	0,6	0,52	0,79
$t_{ВЗП}'$	°С	22,3	134,6	134,5	130,2	122,3
$t_{ст.минВЗП}$	°С	54,1	139	138,8	137,1	141,7
$t_{росыВЗП}$	°С	137,1	136,5	136,9	136,3	137
$t_{ВЗП доп}'$	°С	-	-	137,4	-	126,2
$t_{ст.минВЗП доп}$	°С	-	-	136	-	138,7
$t_{росыВЗП доп}$	°С	-	-	135,9	-	136,6
$N_{ДС}$	кВт	1793	2036	2100	2094	2145
$N_{ДВ}$	кВт	264	469	277	258	358
$N_{РВ}$	кВт	-	541	465	-	-
Режим минимальной нагрузки						
$D_{оп}$	т/ч	210,5	208,8	208,8	209	210,6
$P_{оп}$	кгс/см ²	146,1	146,2	146,2	144,8	143,2
$t_{оп}$	°С	551,5	540,1	540	542,2	540,2
$t_{ух.г}$	°С	119,9	146,8	128	136,7	149,6
V_n	кг/с	9,72	9,8	9,6	9,95	9,2
$KПД_{КА}^{бр}$		92,56	91,26	92,11	90,08	93,2
Доля рециркулирующего /греющего агента		-	0,69	0,7	0,54	0,66
$t_{ВЗП}'$	°С	22,1	135,8	143,5	140,9	135,2
$t_{ст.минВЗП}$	°С	52,5	137,7	145,2	140,5	137,4
$t_{росыВЗП}$	°С	137,3	136,4	136,8	136,6	137,3
$t_{ВЗП доп}'$	°С	-	-	146,4	-	129,4
$t_{ст.минВЗП доп}$	°С	-	-	137,4	-	136,9

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7
$t_{\text{росыВЗП ДПП}}$	°С	-	-	135,5	-	136,7
$N_{\text{ДС}}$	кВт	1133	1275	1400	1352	1257
$N_{\text{ДВ}}$	кВт	160	281	169	158	196
$N_{\text{РВ}}$	кВт	-	408	459	-	-
Z	тыс. руб./г	669411	642091	665193	660488	652196

Анализ полученных результатов расчета позволяет выявить следующие ключевые моменты:

1. Происходит существенное снижение тепловой эффективности котлоагрегата (КПД_{КА}^{6р} в номинальном режиме работы котла снижается с 92,26 % в базовом варианте до 90,69 % для варианта с рециркуляцией горячего воздуха; 91,04 % для варианта с рециркуляцией слабонагретого воздуха; 89,85 % для варианта подогрева воздуха теплом питательной воды). Это связано со снижением температурного напора в воздухоподогревателе и увеличением температуры уходящих газов. Следствием является рост потерь с уходящими газами, снижение тепловой эффективности котлоагрегата, перерасход топлива относительно базовой схемы и увеличение соответствующей составляющей суммарных ежегодных затрат. В схеме с применением каскадного трубчатого ВЗП тепловая эффективность котлоагрегата не снижается, однако это допущение, поскольку тепло, необходимое для подогрева воздуха в калориферной установке, берется у отобранного из турбины пара, однако поскольку расчет турбины и цикла энергоблока целиком не ведется, тепло считается полученным из внешнего источника.

2. Все из выбранных схем позволяют добиться значения минимальной температуры стенки трубок воздухоподогревателя выше температуры точки росы дымовых газов (в результате оптимизации получены следующие значения разницы между минимальной температурой поверхности металла ВЗП и температурой точки росы для номинального режима работы котла: 4,4 °С для варианта с рециркуляцией горячего воздуха; 4,5 °С для основной поверхности ВЗП и 1,1 °С для дополнительной поверхности для варианта с рециркуляцией слабонагретого воздуха; 4,9 °С для варианта с предварительным подогревом воздуха теплом питательной воды; 12,7 °С для основной поверхности ВЗП и 1 °С для каскадной ступени для варианта с использованием КТВП), что приводит к исключению конденсации паров серной кислоты на поверхности ВЗП, а значит к увеличению срока службы поверхности и соответствующей составляющей суммарных ежегодных, связанных с ремонтом поверхности.

3. Согласно результатам расчетов все из рассматриваемых способов предварительного подогрева воздуха перед ВЗП являются экономически целесообразными несмотря на затраты, связанные модернизацией установки и снижением тепловой эффективности котлоагрегата (значение суммарных ежегодных затрат для базового варианта составило 669411 тыс. руб./год, для варианта с рециркуляцией горячего воздуха – 642091 тыс. руб./год, для варианта с рециркуляцией слабонагретого воздуха – 665193 тыс. руб./год, для варианта с использованием тепла питательной воды 660488 тыс. руб./год, для варианта с использованием КТВП – 652196 тыс. руб./год).

4. Наиболее эффективным в соответствии с выбранным критерием оптимальности и с точки зрения поставленной технической задачи является вариант с рециркуляцией горячего воздуха со значением суммарных ежегодных затрат 642091 тыс. руб./год (экономический эффект по сравнению с базовым вариантом составил 27320 тыс. руб./год). Это можно объяснить простотой схемы, отсутствием необходимости установки дополнительных поверхностей, а значит снижением стоимости эксплуатации и ремонта котла.

В заключении отражены основные научные результаты, полученные в ходе проведения диссертационного исследования.

1. Сформулирована задача комплексной технико-экономической оптимизации схемы и параметров котлоагрегата угольной ТЭС при его модернизации с учетом низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя. При этом учтена особенность задач модернизации, заключающаяся в том, что меняется только часть схемы установки и параметры части ее элементов. В соответствии с этим для вариантов модернизации котельного агрегата выбран состав оптимизируемых параметров, включающий некоторые режимные параметры и конструктивные параметры отдельных элементов модернизируемой установки. Сформирован состав ограничений-неравенств, определяющих область допустимых значений параметров установки.

2. Представлена методика определения температуры точки росы дымовых газов на основании расчета термодинамического равновесия химических реакций образования серной кислоты с учетом конденсированного состояния. Апробация основанной на данной методике математической модели расчета температуры точки росы, произведенная в ходе исследований на базе котлоагрегата БКЗ-75-39ФБ, показала хорошее соответствие значений температуры точки росы, получаемых в результате расчета, фактическим. Эта же математическая модель расчета температуры точки росы в дальнейшем использовалась при проведении оптимизационных расчетов вариантов модернизации котлоагрегата БКЗ-420-140.

3. На базе ПВК СМПП-ПК разработаны математические модели котлоагрегатов БКЗ-75-39ФБ и БКЗ-420-140, эффективные при выполнении оптимизационных расчетов. При этом для части элементов проводятся поверочные расчеты при заданных конструктивных характеристиках, а для части элементов – конструкторские расчеты. Разработаны математические модели модернизированного котлоагрегата БКЗ-420-140 с различными способами предварительного подогрева воздуха перед ВЗП, предназначенные для комплексных оптимизационных исследований.

Используемые математические модели котлоагрегатов позволяют достаточно точно описывать происходящие в них процессы, чем достигается необходимое соответствие параметров работы установок, рассчитанных с применением математических моделей, параметрам работы существующего в действительности оборудования, что обеспечивается, по возможности, полнотой исходных данных. Модели позволяют проводить оптимизационные расчеты как по критериям энергетической, так и по критериям экономической эффективности.

4. Приведены результаты комплексных оптимизационных расчетов вариантов модернизации котлоагрегата БКЗ-420-140 с целью сжигания углей с более высоким содержанием серы, чем в проектных углях, по критерию минимума суммарных ежегодных затрат, связанных с реконструкцией, эксплуатацией и ремонтом элементов установки. Оптимизация проводилась с учетом процесса низкотемпературной коррозии.

Анализ полученных результатов дает основания рассматривать исследуемые в работе схемы предварительного подогрева воздуха перед ВЗП котлоагрегата в качестве эффективных с точки зрения решения задачи повышения экономической эффективности при одновременном предотвращении низкотемпературной коррозии. При этом наибольший эффект обеспечивает вариант с предварительным подогревом воздуха организацией рециркуляции горячего воздуха со значением суммарных ежегодных затрат 642091 тыс. руб./год (экономический эффект по сравнению с базовым вариантом составил 27320 тыс. руб./год).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в изданиях перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Тюрина Э.А., Ижганайтис М.И. Математическое моделирование и технико-экономические исследования котлоагрегатов, использующих топливо различного состава, включая отходы предприятий углеобогащения // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2013. – № 11 – 12. – С. 99 – 109.

2. Тюрина Э.А., Ижганайтис М.И. Оптимизационные исследования способов снижения низкотемпературной коррозии конвективных поверхностей котлоагрегата предварительным подогревом воздуха // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – № 4. – С. 176 – 183.

Статьи и научные труды в других изданиях:

3. Ижганайтис М.И. Математическое моделирование паровых котлов на твердом топливе различного состава, включая отходы углеобогащения // Системные исследования в энергетике: Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. – 2012. – № 42. – С. 137 – 140.

4. Ижганайтис М.И. Математическое моделирование паровых котлов на твердом топливе различного состава, включая отходы углеобогащения // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2012. – С. 239 – 242.

5. Тюрина Э.А., Воронков В.В., Ижганайтис М.И. Технологическая оценка использования топлива различного состава, включая отходы углеобогащения, для серосвязывания и улучшения экологических показателей ТЭС // Современная наука: исследования, результаты, технологии. Сборник научных статей. – 2012. – № 3 (11). – С. 8 – 14.

6. Ижганайтис М.И. Техничко-экономическая оценка использования топлива различного состава, включая отходы предприятий углеобогащения, для серосвязывания и улучшения экологических // Системные исследования в энергетике: Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. – 2013. – № 43. – С. 118 – 124.

7. Тюрина Э.А., Ижганайтис М.И. Комплексные исследования возможности использования отходов предприятий углеобогащения в качестве альтернативного топлива // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2013. – Том 1. – С. 156 – 160.

8. Тюрина Э.А., Ижганайтис М.И. Техничко-экономические исследования на математических моделях котлоагрегатов, использующих топливо различного состава, включая отходы предприятий углеобогащения, для связывания оксидов серы // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов. Под ред. Г.В. Ноздренко и др. – 2014 г. – № 18. – С. 7 – 18.

9. Ижганайтис М.И. Оптимизация мероприятий по снижению низкотемпературной коррозии конвективных поверхностей котлоагрегата // Системные исследования в энергетике: Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. – 2014. – № 44. – С. 88 – 94.

10. Ижганайтис М.И. Исследование схем предварительного подогрева воздуха как способа снижения низкотемпературной коррозии конвективных поверхностей котла // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2014. – Том 1. – С. 250 – 256.

