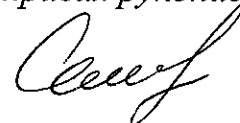


Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи



СЕМЕРГЕЙ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ
ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ТОПКАХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, профессор
Бирюков А.Б.

Донецк – 2020 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ТОПКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ	12
1.1. Роль тепловых электростанций, сжигающих твёрдое топливо	12
1.2. Особенности топок котлов, сжигающих твёрдое топливо в пылевидном состоянии	14
1.3. Физико-химические основы сжигания пылеугольного топлива	16
1.4. Расчеты горения пылеугольного топлива и математические модели	25
1.5. Рациональные параметры измельчения	29
1.6. Рациональные параметры горелок	31
1.7. Газоплотные топки	34
1.8. Технология плазменной безмазутной растопки пылеугольных котлов	37
1.9. Использование анаклаида при сжигании твёрдого топлива	40
1.10. Результаты внедрения сжигания топлива на котлах с умеренным контролируемым химическим недожогом	42
Выводы по разделу 1	44
РАЗДЕЛ 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	46
2.1. Математическая модель выгорания полифракционного факела.....	46
2.2. Исследование параметрической чувствительности усовершенствованной математической модели.....	55
2.3. Методики определения характеристик топлива.....	63
Выводы по разделу 2	69
РАЗДЕЛ 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВА В КОНКРЕТНЫХ УСЛОВИЯХ.....	71

3.1. Постановка задачи определения времени задержки воспламенения в конкретных условиях	71
3.2. Методика определения времени задержки воспламенения	72
3.3. Определение времени задержки воспламенения до и после реконструкции горелок.....	75
Выводы по разделу 3	77
РАЗДЕЛ 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ГЛУБИНУ ВЫЖИГАНИЯ.....	79
4.1. Сущность реконструкции пылесистемы, позволяющей обеспечить предварительный тепловой контакт ПУТ и горячего воздуха.....	79
4.2. Получение экспериментальных данных.....	81
4.3. Теоретическое описание полученных результатов.....	84
4.4. Обоснование полученных результатов.....	88
Выводы по разделу 4.....	89
РАЗДЕЛ 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО НЕДОЖОГА ПРИ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ ПУТ ОТ СТЕПЕНИ ГАЗОПЛОТНОСТИ ТОПКИ	91
5.1. Постановка задачи	91
5.2. Методика исследования влияния степени газоплотности топки на величину механического недожога	92
5.3. Результаты исследования	95
Выводы по разделу 5.....	98
РАЗДЕЛ 6. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ	99
6.1. Экологические показатели	99
6.2. Экономический эффект	102
Выводы по разделу 6.....	106
ВЫВОДЫ.....	108

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	112
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Простейшие аналитические зависимости для определения времени выгорания сферической углеродной частицы.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Подмодель термохимических превращений твердого топлива.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Подмодель процесса горения и тепломассообмена пылеугольных частиц в газовом потоке.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Принципиальная схема пылесистемы замкнутого типа.....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Схема улиточно-лопаточной горелки после реконструкции	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Назначение и технические характеристики трубки Прандтля	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Акт внедрения результатов диссертационного исследования на Старобешевской ТЭС	136
ПРИЛОЖЕНИЕ З. Акт внедрения результатов диссертационного исследования в учебный процесс	137

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Несмотря на успешную работу в мировой энергетике атомных электростанций и существенные достижения в области альтернативной энергетики, производство электроэнергии на тепловых электростанциях продолжает играть важную роль. Значительная часть теплоэлектростанций работает на твердом топливе, сжигаемом факельным способом в пылевидном состоянии. Исследования в области промышленной теплоэнергетики, направленные на повышение КПД таких энергетических котлов, сохраняют свою актуальность и сегодня. Одним из важных направлений этой работы является повышение степени выгорания топлива. Благодаря исследованиям многих иностранных и отечественных ученых в настоящее время достаточно глубоко изучены физико-химические закономерности выгорания твердого топлива, в частности в пылевидном состоянии; разработана концептуальная модель выгорания пылеугольного топлива, создан ряд специализированных математических моделей. В практическом плане для решения этой задачи в качестве типовых решений применяют совершенствование конструкции горелок и замену обычных щелевых топок на газоплотные. В качестве одного из сравнительно новых, но в некоторой мере апробированных решений используется предварительная тепловая обработка топлива, например при помощи плазматронов. Новыми, вызывающими неоднозначное отношение специалистов предложениями, являются использование добавок активного горения, например, анаклаида «РА-ГЕН-Ф»; внедрение в процесс сжигания твердого топлива технологии XPlate™.

Однако вопрос повышения качества выжигания пылеугольного топлива (ПУТ) в топках энергетических котлов на данное время не является окончательно решенным. На практике степень механического недожога может достигать 10% и более, особенно при сжигании высокосольных топлив, что повышает расход топлива и ухудшает экологические показатели. В каждом конкретном случае эта задача, даже при использовании в целом известных технологических и

конструктивных приемов, может быть эффективно решена только путем их адаптации с проведением дополнительных научных исследований. Поэтому тема диссертационного исследования является актуальной для промышленной теплоэнергетики.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Результаты работы направлены на решение задач, соответствующих научному направлению кафедры технической теплофизики ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»: «Развитие теоретических и технологических основ рационального управления тепло-массообменными процессами в различных технологиях». Результаты, связанные с изучением влияния предварительной тепловой обработки топлива на глубину выгорания, получены в рамках выполнения гостемы Н 5-17 «Повышение уровня энергоэффективности и качества тепловой обработки материалов».

Результаты работы направлены на решение задач, поставленных в Государственной программе развития и реформирования горно-металлургического комплекса Украины и в Программе научно-технического развития Донецкой области на период до 2020 года (постановление областного Совета от 22.03.2002 г., номер 3/25-656).

Целью работы является научное обоснование комплекса технологических и конструктивных параметров технологии сжигания, позволяющих повысить степень выгорания пылеугольного топлива в топке энергетического котла.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи:

- провести аналитический обзор известных научных и технических решений в области совершенствования технологии сжигания твердого топлива в пылевидном состоянии;
- усовершенствовать известную упрощенную математическую модель выгорания пылеугольного топлива в топке энергетического котла для обеспечения возможности учета реального фракционного состава топлива;

- исследовать параметрическую чувствительность усовершенствованной математической модели;
- разработать способ адаптации математической модели выгорания пылеугольного топлива для учета особенностей технологии сжигания;
- провести теоретическое и экспериментальное исследование влияния предварительной тепловой обработки пылеугольного топлива на глубину выжигания;
- исследовать влияние степени газоплотности топки на глубину выжигания.

Объектом для исследования данной работы является процесс сжигания ПУТ в топке энергетического котла.

Предметом исследования являются закономерности влияния технологических и конструктивных параметров топки энергоблока на глубину выгорания пылеугольного топлива.

Методы исследования. Для решения значительной части поставленных задач использована усовершенствованная детерминированная математическая модель исследуемого процесса. Для этой модели выполнена оценка ее параметрической чувствительности по всем основным параметрам. Отработан способ адаптации математической модели к особенностям реальных энергетических котлов. Для решения задачи о влиянии предварительной тепловой обработки пыли на глубину выжигания проведены отборы проб пыли перед разными горелками работающего блока и анализ этих проб на влагу и выход летучих проведен в сертифицированной лаборатории. Для теоретического описания процесса выхода летучих использована однокомпонентная схема. Для исследования влияния степени газоплотности топки при помощи стандартной методики расчета горения в топке и разработанной математической модели проведен ряд численных экспериментов для различных уровней присоса холодного воздуха в топку.

Научная новизна полученных результатов:

1. В развитие способов моделирования процесса выгорания ПУТ в топках энергетических котлов усовершенствована известная упрощенная математическая

модель, что обеспечило возможность ее использования для исследования глубины выгорания полифракционного ПУТ при одновременном учете особенностей выгорания каждой из фракций угольной пыли, определяемых ее средним размером и зольностью.

2. Впервые экспериментально установлено значение константы скорости процесса возгонки летучих веществ при предварительном прогреве угольной пыли из углей марок А и Т, достигаемом за счет обеспечения более раннего контакта топлива с горячим воздухом при переврезке пылепроводов высокой концентрации в условиях котлов ТП-100 Старобешевской ТЭС.

3. Дальнейшее развитие получили представления о совершенствовании процесса сжигания ПУТ при переходе на газоплотные топki за счет установления численным способом закономерностей влияния такой реконструкции на определяющие технологические параметры процесса и глубину выгорания топлива.

4. Впервые разработан способ адаптации математической модели выгорания пылеугольного топлива в топках энергетических котлов за счет введения в модель времени запаздывания воспламенения, как подстроечного параметра. При сопоставлении результатов численных экспериментов и доли несгоревшего углерода в золе уноса установлены конкретные значения времени задержки воспламенения для разных типов пылеугольных горелок.

Положения, выносимые на защиту:

– усовершенствованная математическая модель выгорания полифракционного ПУТ, позволяющая учесть особенности выгорания каждой из фракций угольной пыли, определяемые ее средним размером и зольностью, и обеспечить возможность управления процессами интенсивного сбережения энергетических ресурсов в промышленных теплоэнергетических устройствах;

– экспериментально установленное значение константы скорости процесса возгонки летучих при предварительном прогреве угольной пыли из углей марок А и Т, обеспеченном за счет более раннего контакта топлива с горячим воздухом;

– закономерности влияния реконструкции, связанной с переходом на газоплотные топки, на определяющие технологические параметры процесса и глубину выгорания топлива;

– способ адаптации математической модели выгорания пылеугольного топлива в топках энергетических котлов, основанный на введении в модель времени запаздывания воспламенения, как подстроечного параметра.

Практическая значимость работы состоит в разработке комплекса методик, с помощью которого можно спланировать и провести работы по повышению эффективности сжигания ПУТ в топках энергетических котлов. С помощью усовершенствованной математической модели имеется возможность с достаточной точностью прогнозировать величину механического недожога, который будет получен в конкретных условиях при заданном фракционном составе топлива, что важно для обоснования рациональных параметров размола угля, улучшения технико-экономических показателей работы котлов тепловых электростанций и экономии энергетических ресурсов. Разработанный способ адаптации математической модели делает возможным ее использование для любых энергетических котлов, сжигающих ПУТ. Способ установления значений констант скорости процесса возгонки летучих при предварительном прогреве угольной пыли из углей марок А и Т может быть достаточно просто реализован в условиях любой ТЭС; далее с использованием этих значений можно определить целесообразность переврезки пылепроводов высокой концентрации и установить рациональные параметры такой реконструкции. Установленные закономерности влияния перехода на газоплотные топki на глубину выжигания ПУТ позволяют определить рациональные параметры реконструкции в конкретных условиях. Все результаты диссертационного исследования внедрены в условиях Старобешевской ТЭС за период с 2010 по 2016 г., что позволило достичь существенного снижения величины механического недожога и обеспечить планомерное сокращение удельного расхода условного топлива с 425 до 380 г/(кВт·ч).

Степень достоверности результатов, полученных в диссертационной работе, основана на корректном использовании известных закономерностей теории горения топлива и теплообмена; применении для расчетов апробированных методик выполнения теплового расчета парогенераторов, выполнении всех требования соответствующих ГОСТов, использовании поверенного и сертифицированного оборудования при выполнении измерений и использовании апробированных стандартных подходов математической статистики для обработки результатов экспериментов.

Личный вклад соискателя заключается в выполнении анализа состояния технологий сжигания пылеугольного топлива в топках энергетических котлов, исследовании параметрической чувствительности математической модели, адаптации модели к конкретным производственным условиям, проведении численных экспериментов и анализе их результатов, отборе и анализе проб пыли до и после переврезки пылепроводов высокой концентрации, участии в лабораторных исследованиях по определению остаточного содержания летучих веществ и влаги в пробах отобранной пыли, обработке результатов экспериментов при помощи методов математической статистики и определении значений константы скорости возгонки летучих, расчетном изучении влияния факторов использования газоплотных топок на определяющие технологические параметры процесса и глубину выгорания топлива, систематизации подходов по совершенствованию технологии сжигания ПУТ в конкретных условиях.

Апробация результатов. Материалы диссертации были доложены и обсуждены на научных семинарах кафедр технической теплофизики ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» и физики неравновесных процессов метрологии и экологии ГОУВПО «Донецкий национальный университет»; на международных научно-технических конференциях: XII Международной научной конференции аспирантов и студентов «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» (ДонНТУ, Донецк, 2018); III Международной научно–технической конференции «Энергетические системы» (БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2018).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 6 печатных работах, в том числе в 5 рецензируемых научных изданиях; 3 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утверждённый ВАК ДНР, эти же работы входят в перечень ВАК РФ. Одна работа включена в международные реферативные базы.

Объём и структура диссертации. Работа состоит из введения, шести основных разделов, выводов, списка используемых источников и 8 приложений. Общий объём работы составляет 137 страниц, в том числе 111 страниц основного текста, 27 рисунков и 18 таблиц, 12 страниц списка использованных источников, состоящего из 125 наименований, 14 страниц приложений.

ГЛАВА 1

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ТОПКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ

1.1 Роль тепловых электростанций, сжигающих твёрдое топливо

Для полноценного функционирования промышленных предприятий, для обеспечения бытовых нужд и остальных потребностей современного человека необходимо значительное количество электрической энергии. Основными источниками электроэнергии являются тепловые электростанции (ТЭС) и атомные электростанции (АЭС). Существенная доля электроэнергии также производится на гидроэлектростанциях (ГЭС). За последние два десятилетия наблюдается рост значения нетрадиционной энергетики (солнечные, ветровые электростанции и т.д.).

Основным источником электроэнергии в мире были и остаются ТЭС. На них в последнее время приходится около 60% мирового производства электроэнергии [1-3, 9]. Сущность производства электроэнергии на ТЭС заключается в том, что энергия, выделяющаяся от сжигания органического топлива, используется для производства водяного пара, а тот в свою очередь направляется на паровую турбину, приводящую в движение электрогенератор. Обычно при работе ТЭС вырабатывается не только электрическая энергия, но и производится отпуск потребителям тепловой энергии с горячей водой в качестве теплоносителя. Широкое распространение ТЭС обусловлено доступностью запасов органического топлива (прежде всего твердого топлива) [10].

Существенной проблемой классических ТЭС, является низкий термический КПД цикла Ренкина, обуславливающий довольно низкое значение КПД всего цикла генерации (35-40%). Это связано, прежде всего, с передачей огромных количеств теплоты от конденсирующегося пара охлаждающей воды в конденсаторе, а от нее в окружающую среду [11].

С термодинамической точки зрения наилучшим способом повышения эффективности генерации электрической энергии при использовании органического топлива является использование бинарных циклов в рамках парогазовых станций. Термический КПД в этом случае достигает 60% и более. Однако в общем случае парогазовые станции в качестве топлива используют газообразное топливо [12]. Выработка электроэнергии на природном газе характеризуется повышенной себестоимостью. Для использования твердого топлива необходима его предварительная газификация. Известны примеры использования газов подземной газификации для обеспечения топливом ТЭС, более распространен опыт использования обычных стационарных газогенераторов.

Интересным и перспективным способом улучшения технико-экономических характеристик выработки электроэнергии при использовании твердого топлива является использование технологии сжигания низкосортного высокозольного угля в циркулирующем кипящем слое. При практической реализации этой технологии встречается ряд сложностей, в то же время в мире имеется целый ряд успешно работающих энергоблоков такого типа.

Тем не менее, большое количество ТЭС продолжает работать на твердом топливе, реализуя его сжигание в топках энергетических котлов в пылевидном состоянии. Анализ тенденций в области производства электроэнергии в мировой практике позволяет сделать вывод, что на перспективу двух-трех десятилетий традиционный угольные ТЭС будут использоваться для производства электроэнергии в странах, обладающих достаточными запасами твердого топлива. Поэтому вопросы, связанные с улучшением технико-экономических характеристик ТЭС, сжигающих твердое топливо в пылевидном состоянии, сохраняют свою актуальность.

Одной из статей потерь энергии при сжигании твердого топлива являются потери с механическим недожогом, связанные с тем, что не весь углерод коксового остатка частиц угольной пыли успевает полностью выгореть за время их пребывания в топочном пространстве. В настоящее время в среднем потери

энергии с мехнедожогом при сжигании антрацитов и тощих углей в пылевидном состоянии составляют до 6-10% и поэтому, задача их сокращения продолжает быть актуальной.

Вопросы снижения механического недожога являются крайне важными не только с технико-экономической, но и с экологической точки зрения, поскольку при их успешном решении уменьшаются выбросы золы в атмосферу, снижается нагрузка на угольную отрасль, которая также является очень серьезным загрязнителем окружающей среды.

1.2 Особенности топок котлов, сжигающих твёрдое топливо в пылевидном состоянии

Для сжигания твердого топлива в камерных топках на современных тепловых электрических станциях его предварительно измельчают и в виде пыли в смеси с воздухом подают в топку, где оно сгорает, находясь в потоке газов во взвешенном состоянии. Превращение крупных кусков влажного топлива в пригодную для сжигания сухую угольную пыль происходит в системе пылеприготовления, и включает в себя предварительное грубое дробление на куски размером в несколько десятков миллиметров, подсушку и дальнейший размол до пылевидного состояния с размером частиц в несколько десятков или сотен микрометров. Многократное увеличение поверхности реагирования достигается путем превращения кускового топлива в угольную пыль [13]. Например, дробление куска угля диаметром 15 мм на частицы размером 50 мкм приводит к увеличению суммарной площади поверхности полученных частиц в 300 раз. Условия сжигания существенно улучшаются при увеличении поверхности реагирования, поскольку горение твердого топлива является гетерогенным процессом, происходящим на поверхности частиц топлива. К главным преимуществам сжигания твердого топлива в пылевидном состоянии обычно относят следующие:

- возможность сжигания любого топлива, в том числе низкорекреационных антрацитов и тощих углей, а также высоковлажных и высокозольных углей и отходов углеобогащения с достаточно высоким КПД;

- отсутствие ограничений по условиям сжигания топлива на единичную мощность котла;

- легкость регулирования процесса, полная механизация и возможность полной автоматизации топочного процесса;

- повышенная эксплуатационная надежность агрегата, обусловленная отсутствием подвижных деталей в топке.

Основные недостатки сжигания топлива в пылевидном состоянии:

- сложность и громоздкость оборудования пылеприготовления, которое также в большинстве случаев характеризуется высокой стоимостью;

- затраты значительного количества электроэнергии для пылеприготовления, например, для антрацита удельные затраты электроэнергии составляют 25...30 кВт·ч/т;

- низкая объемная плотность тепловыделения в топке при факельном сжигании твердого топлива (0,1...0,3 МВт/м³). Эта ситуация объясняется малой массовой концентрацией топлива в единице объема топки (20...30 г/м³) и низкими относительными скоростями горящих частиц в газоздушном потоке, что создает достаточно неблагоприятные условия подвода кислорода к поверхности реагирования и отвода продуктов сгорания [14].

В топках с жидким шлакоудалением температуру в нижней части топочной камеры поддерживают такой, чтобы обеспечить не только полное расплавление, но и надежное удаление шлаков в жидком виде из топки.

В камере горения экранные трубы ошипованы и покрыты огнеупорной обмазкой, в связи с чем температура там составляет 1700...1800 °С. В камере улавливается 30...40 % золы топлива, которая удаляется в жидком состоянии через летку. Охлаждение газа и уносимой золы обеспечивается при помощи расположенных в верхней части топки открытых экранных поверхностей.

Основная доля расплавленного шлака улавливается в камере горения. Шлак, дополнительно уловленный в сепараторе, стекает на подину топки, а далее через летку поступает для грануляции в водяную ванну [15].

Общие правила сжигания топлива в твердоотопливных котлах заключаются в том, чтобы было достигнуто более полное его сгорание, максимально сокращены всякого рода потери топлива и достигнута высокая температура в топке.

Для поддержания нормального процесса горения топлива необходимо:

- иметь тягу, достаточную для отвода дымовых газов из топочного пространства и поступления воздуха в топку для обеспечения нормального процесса горения;
- крупные куски угля и антрацита, для сжигания факельным способом, необходимо измельчить в пылесистеме, чтобы остаток на сите R-90 составлял не более 10 %;
- при подаче топлива регулировать тягу и дутье, своевременно подавать требуемый для горения топлива воздух;
- топливо подаётся на основные горелки непрерывно;
- при шлаковании топлива усиливать дутье.

1.3 Физико-химические основы сжигания пылеугольного топлива

Процесс горения твердого топлива состоит из нескольких стадий [16]:

- предварительный прогрев топлива и испарение гигроскопической влаги;
- разложение сложных высокомолекулярных соединений и выделение летучих веществ;
- горение летучих веществ в районе частицы твердого топлива, определяющее его дальнейший прогрев;
- воспламенение коксовой частицы при достижении температуры 800 °С;
- выгорание коксовой частицы.

Если в газовом потоке имеется окислитель и температура газовой среды, окружающей частицу, превышает температуру воспламенения горючих

газообразных соединений, входящих в состав летучих, происходит их воспламенение [17]. На практике хорошо известна эта закономерность: легко воспламеняется топливо с высоким выходом летучих (бурый уголь, каменный уголь марок Д и Г), в то время как антрацит, имеющий в классе твердых топлив наименьший выход летучих (менее 9 %), трудно воспламеняется.

В случае реального топлива приходится иметь дело с полидисперсным составом. Наиболее ярко полидисперсность проявляется для угольной пыли. По этой причине прогрев частиц твердого топлива и другие обозначенные выше процессы протекают для разных частиц неодновременно и потому накладываются друг на друга.

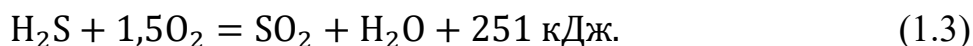
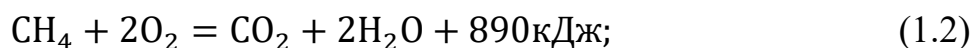
Решающую роль при оценке суммарного времени горения топлива и общего тепловыделения играет процесс горения коксовой частицы [18]. Даже в случае сжигания топлив с большим выходом летучих доля тепла от выгорания коксовой частицы составляет не менее 60% от общего тепловыделения.

Доля остающегося после выделения летучих углерода может быть оценена как:

$$C_{nr} = C^p - 0,375 \cdot O^p - 3 \cdot H^p - 0,1875 \cdot k_s \cdot S^p; \quad (1.1)$$

Эта зависимость предполагает, что в качестве летучих газов в зоне возгонки выделяются: H_2S , CH_4 , H_2 , N_2 , CO_2 , H_2O , C_mH_n и др. Согласно работе [20] предполагается, что в итоговый состав летучих включены H_2S , CH_4 , N_2 , CO_2 , H_2O . Выход этих компонентов (m^3/kg) можно рассчитать при помощи специальных зависимостей [20].

Горение летучих соединений протекает по следующим итоговым реакциям:

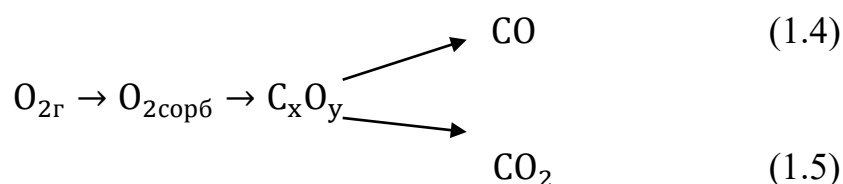


Наиболее продолжительным этапом выгорания топлива является горение коксового остатка частицы. Он определяется кинетикой горения, а также и диффузионным переносом кислорода и продуктов сгорания в окрестности поверхности частицы.

Кинетика горения коксовой частицы

На кинетику горения большое влияние оказывает структура углеродного материала [19-22]. Углерод кокса представляет собой практически чистый углеродный материал, по структуре близкий к графиту, который представляет собой аморфное углеродное образование со структурой, состоящей из хаотически расположенных кристаллитов, размеры которых варьируются в пределах от десяти до десятков тысяч ангстрем. Также следует иметь в виду, что поверхность частицы топлива (коксового остатка) имеет на себе огромное количество микротрещин и пор разнообразной формы и структуры. Поры могут проникать глубоко внутрь углеродной частицы и соединяться между собой, что приводит к образованию значительной внутренней поверхности, в ряде случаев превышающей внешнюю. При наличии доступа окислителя к внутренней поверхности частицы имеет место внутреннее реагирование. Механизм взаимодействия поверхности углеродной частицы с окислителем O_2 , CO_2 , H_2O , согласно последним представлениям, предполагает наличие промежуточных нестабильных образований, которые в течение некоторого времени адсорбированы на наружной поверхности углеродного массива или внутри пор. Считается, что адсорбционные процессы протекают по механизму хемосорбции, предполагающему, что атомы, образующие поверхность твердого материала, стремятся образовать химические связи с веществом контактирующей с ним фазы.

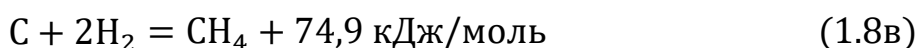
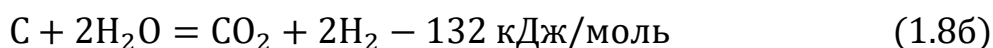
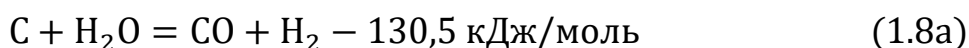
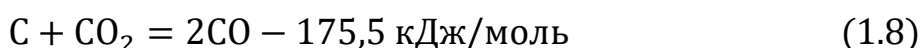
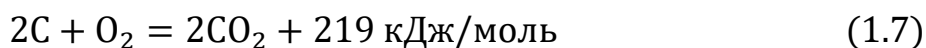
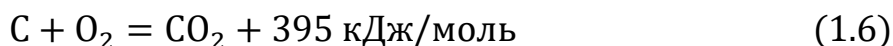
Следующая упрощенная схема описывает сорбционный механизм взаимодействия кислорода с углеродом:



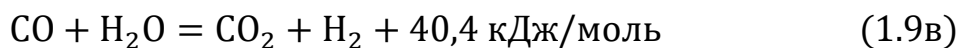
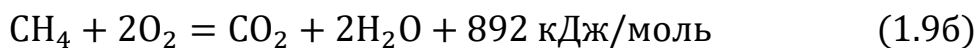
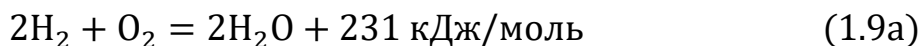
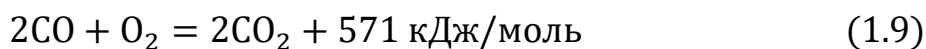
Температура и структура углеродной поверхности определяют скорость протекания сорбционного процесса. При высоких температурах он протекает практически мгновенно.

В общем случае выгорание углеродных частиц характеризуется крайне сложным механизмом. В настоящее время принята схема для его описания, учитывающая возможность параллельного протекания следующих химических реакций:

- на наружной поверхности и внутри пор



- в условиях встречной диффузии продуктов неполного сгорания от поверхности углеродной частицы в поток окислителя, диффундирующего им навстречу из окружающего объема



Исследователи полагают, что для реакций углерода с O_2 , CO_2 , H_2O (уравнения 1.6, 1.7, 1.8-1.8в) в широком диапазоне температур можно принимать первый порядок. С точки зрения кинетики процесса скорость этих реакций может быть описана при помощи уравнения вида:

$$W = k \cdot C_{\text{по}}, \quad (1.10)$$

где k – константа скорости поверхностной реакции,

$C_{\text{по}}$ – концентрация реагирующего компонента у поверхности частицы.

В общем случае скорость гомогенных реакций определяется концентрациями обоих реагирующих компонентов. Доказано, что скорость горения таких компонентов как CO , H_2 и CH_4 определяется их содержанием и только при малых концентрациях кислорода начинает зависеть от его содержания.

Исходя из этого, для высокотемпературного горения по реакциям (1.9-1.9в) целесообразно принять первый порядок относительно компонента, находящегося в недостатке.

Поскольку рассматриваемые поверхностные реакции характеризуются первым порядком скорости, моментальная скорость расходования компонентов (кмоль/(м²·с)) находится как:

$$dG_i = C_i \cdot k_{0i} \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{R \cdot T}\right) \cdot dt, \quad (1.11)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса, м/с;

C – концентрация компонента газовой фазы, который определяет скорость реакции, кмоль/м³;

E – энергия активации рассматриваемой реакции, кДж/моль;

R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);

T – температура, при которой протекает реакция, К;

i – индекс, указывающий на конкретную реакцию.

Аналогичное выражение можно использовать и для объемных реакций, с той разницей, что скорость расходования вещества будет определяться как кмоль/(м³·с), а константы скорости реакций имеют единицы измерения с⁻¹.

В таблице 1.1 приведены экспериментально установленные значения энергий активации, которые определяют горение углеродной частицы.

Таблица 1.1. Энергия активации для различных реакций.

Реакция	Значение E , кДж/моль	
	Электродного угля	Кокса разных топлив
$C + O_2 = CO_2$	210-90	140-75
$2C + O_2 = 2CO$	210-140	125-85
$C + CO_2 = 2CO$	100-360	200-100
$C + H_2O = CO + H_2$	160-330	140-180

Общепринятым в настоящее время считается подход, согласно которому обработка экспериментальных данных и расчеты скорости изучаемых реакций

ведутся с использованием концепции полюса, в котором сходятся линии зависимости констант скорости реакций от температуры. Это позволяет установить связь между константой скорости для произвольной температуры и энергией активации.

В работах различных исследователей [23] приводятся несколько отличающиеся координаты полюса, что приводит к разным расчетным выражениям. Для описания связи между k_0 и E обычно используется следующее выражение:

$$\lg k_0 = 0,2 \cdot 10^{-4} \cdot E + 2. \quad (1.12)$$

Диффузионный перенос газообразных компонентов в районе поверхности частицы

Массообменные процессы в окрестности горячей частицы обычно описываются при помощи концепции приведенной пленки [24-27]. Она предполагает, что в ядре потока, омывающего частицу, имеет место интенсивный молярный перенос, вызванный турбулентными пульсациями, а в пределах условной пограничной пленки происходит исключительно молекулярный перенос. Такой подход позволяет считать основной газовый поток однородным, а приведенную пограничную пленку – областью ярко выраженных градиентов температур, концентраций и парциальных давлений газообразных компонентов.

Для определения потока вещества к поверхности реагирующей частицы $\text{кмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ в соответствии с законами молярного и молекулярного переноса используются следующие зависимости:

$$G = \alpha_D \cdot (C_{\text{ПО}} - C_{\text{ОБ}}); \quad (1.13)$$

$$G = D \frac{C_{\text{ПО}} - C_{\text{ОБ}}}{\Delta}, \quad (1.14)$$

где α_D – коэффициент молярного переноса (определяется с использованием соответствующего критериального уравнения), $\text{м}/\text{с}$;

D – коэффициент молекулярной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;

Δ – толщина приведенной пленки, м ;

$C_{\text{по}}, C_{\text{об}}$ – концентрации изучаемого газообразного компонента у поверхности частицы и в основном газовом потоке соответственно, кмоль/м³.

Толщина приведенной пленки определяется при помощи следующего выражения:

$$\Delta = \frac{D}{\alpha_D}. \quad (1.15)$$

Часто используется следующее важное соотношение:

$$\frac{\Delta}{\delta} = \frac{D}{\alpha_D \cdot \delta} = \frac{1}{Nu_D}, \quad (1.16)$$

где δ – характерный размер горячей частицы, м;

Nu_D – диффузионный критерий Нуссельтай.

Экспериментально установлено, что при вихревом и факельном способах сжигания частицы топлива перемещаются вместе с потоком дымовых газов при очень малых скоростях обтекания их газовым потоком. Из экспериментального опыта известно, что при факельном сжигании облако продуктов сгорания окружает частицу топлива и из-за этого тормозится подвод кислорода к поверхности. Известна следующая обобщенная критериальная зависимость, полученная в результате экспериментальных исследований по теплообмену между малой сферической частицей и газовым потоком:

$$Nu_D = 2 + 0,33 \cdot Re^{0,5}, \quad (1.17)$$

где Re – критерий Рейнольдса, соответствующий режиму течения среды.

Из выражения (1.17) очевидно, что для течений с $Re < 1$ (что соответствует скорости витания мелких частиц) $Nu \rightarrow 2$. Исходя из этого, записываются выражения:

$$Nu_D = \frac{\alpha_D \cdot \delta}{D} = 2; \quad (1.18)$$

$$\alpha_D = \frac{2 \cdot D}{\delta}. \quad (1.19)$$

Зависимость (1.19) отражает логичную закономерность, согласно которой коэффициент диффузионного массообмена обратно пропорционален диаметру частицы. Следовательно, уменьшение размера топлива приводит к интенсификации диффузии кислорода к поверхности частицы.

Различные схемы протекания физико-химических процессов в пограничном слое

Три характерных случая могут различаться в зависимости от характера и глубины протекания процессов взаимодействия CO и H₂ с кислородом в пределах приведенной пленки [28-30]:

- схема горящего пограничного слоя. В этом случае, несмотря на взаимодействие с CO и H₂, кислород достигает поверхности частицы и вступает в реакцию с ней. Такая ситуация возникает при сравнительно невысоких температурах и малой толщине пограничного слоя;

- схема двойного горящего пограничного слоя. В пределах приведенной пленки кислород практически полностью расходуется на окисление CO и H₂ и, таким образом, не достигает поверхности частицы. В этом случае выгорание углерода протекает только по восстановительным реакциям, в которых он взаимодействует с водяным паром и углекислотой. В пределах пограничного слоя выделяют негорящие и горящую области, причем зона горения находится между зонами, в которых горение отсутствует. Такая схема проявляется при высокой температуре процесса в случае горения сравнительно крупных частиц или при слоевом горении;

- схема с негорящим пограничным слоем. В этом случае скорость горения CO и H₂ невелика и можно считать, что его протекание в пределах приведенной пленки практически не влияет на распределение концентраций кислорода и других компонентов. При такой схеме процесса преимущественно диффузионные процессы протекают в пределах приведенной пленки, а горение CO и H₂ имеет место в основном газовом потоке. Мелкие углеродные частицы выгорают по такой схеме при умеренных температурах 1200-1600 К.

Для прогнозирования схемы процессов, протекающих в границах приведенной пленки при конкретных условиях, используется критерий Семенова:

$$Se = \sqrt{\frac{k_4 \cdot \Delta^2}{D}} = \frac{\sqrt{k_4 \cdot D}}{\alpha_D}, \quad (1.20)$$

где k_4 – константа скорости реакции горения газообразных компонентов в границах приведенной пленки.

Диапазону значений критерия Семенова $Se \leq 0,4$ соответствует схема с негорящим пограничным слоем. В диапазоне $0,4 < Se < 2$ процессы в приведенной пленке протекают по схеме горящего пограничного слоя. При $Se \geq 2$ схема двойного горящего пограничного слоя применяется для анализа процессов. Для случая, когда $Se > 100$, зона, в которой протекает горение CO и H₂, становится настолько тонкой, что названные реакции можно считать происходящими на какой-то условной поверхности внутри приведенной пленки.

Строение газовой среды в пределах приведенной пленки

Температура газов в области приведенной пленки и парциальное давление кислорода в окружающем газовом пространстве определяют соотношение CO и CO₂ у поверхности частицы. Если температура в окрестности частицы составляет не менее 1200°C и имеется достаточное количество свободного кислорода в топочном пространстве, совокупность протекающих химических реакций описывается следующим итоговым уравнением [32]:



А при температуре выше 1500 °C



Поэтому, в случае повышения температуры в окрестности частицы, возрастает доля CO у ее поверхности. Подача в топочное пространство воздуха в количестве, достаточном для обеспечения нормального горения, догорание CO будет происходить в потоке продуктов сгорания.

Влияние зольной оболочки на выгорание сферической углеродной частицы

При горении углеродной частицы взаимодействие с золовой составляющей может развиваться по одному из следующих вариантов [33]:

- при достаточно высокой температуре горячей частицы зола будет собираться в виде отдельных капель на ее поверхности. В этом случае доля реагирующей поверхности, покрытой каплями, будет незначительна, а если расплавленная зола не смачивает поверхность частицы, то возможен даже срыв капель с ее поверхности;

- если температура горячей частицы ниже температуры плавления золы, на частице образуется пористая зольная оболочка, которая нарастает во времени и в некоторой мере препятствует подводу к поверхности углерода кислорода и других газообразных компонентов. Для проведения высокоточных расчетов необходим учет этого явления. Однако при выполнении инженерных расчетов для случая сжигания твердых топлив с умеренной зольностью влиянием зольной оболочки на время выгорания можно пренебрегать. Простейшие аналитические зависимости для определения времени выгорания сферической углеродной частицы представлены в Приложении А.

1.4 Расчеты горения пылеугольного топлива и математические модели

В настоящее время при проектировании топок котельных агрегатов, работающих на пылевидном угольном топливе и выборе рациональных параметров сжигания, перспективным является использование методов математического моделирования [35]. Такой подход в общем случае позволяет при проведении численных экспериментов рассматривать объект в реальном масштабе и без существенных временных и материальных затрат исследовать влияние изменения технологических и конструктивных параметров.

Применительно к рассматриваемой задаче возможен ряд подходов:

– комплексные модели, в математической формулировке которых предусмотрено описание физико-химических процессов горения, теплообменных и аэродинамических процессов в топке котла;

– модели, учитывающие комплекс процессов, связанных со всеми этапами выгорания топлива;

– упрощенные модели, нацеленные только лишь на исследование основной стадии горения ПУТ – выгорание коксового остатка частиц.

Комплексные модели имеют в своей формулировке как уравнения в частных производных, описывающие состояние тел, участвующих в теплообмене и аэродинамические процессы в топке, так и набор обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих этапы выгорания частиц. Решение таких задач в настоящее время производится исключительно в среде специализированных вычислительных пакетов (как стандартных ANSYS, Comsol и т.д.), так и специально создаваемых исключительно для решения задач моделирования процессов в топках и газоходах парогенераторов.

Одним из примеров несколько более простых моделей является модель, представленная в работе [46]. В ее состав входят две подмодели: термохимического превращения твердого органического топлива и процесса горения и тепло- массообмена пылеугольных частиц в газовом потоке.

Подмодель термохимических превращений твердого топлива представлена набором обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка (Приложение Б). Помимо кинетических уравнений эта система включает уравнение, обеспечивающее выполнение закона сохранения массы. На основе кинетической модели выполнен численный эксперимент применительно к решению задачи описания процесса выгорания бурых углей Канско-Ачинского бассейна (Бородинского, Березовского и Назаровского месторождений) на различные скорости линейного нагрева при $b = 10^{-1}$, 10^2 и 10^4 град/с ($b = dT/d\tau$ – температура нагрева).

Подмодель процесса горения и тепло- массообмена пылеугольных частиц в газовом потоке также представлена набором дифференциальных уравнений 1-го порядка, приведенных в Приложении В.

Данная подмодель наряду с известными моделями дополнительно учитывает: вклад тепловых эндо- и экзоэффектов испарения влаги с поверхности угля и выхода летучих веществ; массообмена для промежуточных продуктов неполного горения и газификации коксового остатка; массообмена для конечных продуктов термохимического превращения пылеугольной частицы, в частности, диоксида углерода и водяных паров.

Несмотря на громоздкость математической модели в численном плане, она реализуется достаточно просто, но при таком количестве изучаемых процессов очень сложно решается задача проверки адекватности и адаптации математической модели. Применение такого плана моделей оправдано для случая, когда изучается случай сжигания высокорекреационного ПУТ с большим выходом летучих. При сжигании низкорекреационных топлив (уголь марок Т и А), для которых доминирующей является стадия выгорания коксового остатка, целесообразно использование более простых математических моделей.

Для практических расчетов выгорания ПУТ широко используется схема негорящего пограничного слоя, в теории приведенной пленки известна упрощенная математическая модель выгорания пылеугольного топлива, предложенная в работе [37]. При ее решении моделирование ведется для одного «представительного» размера частиц угольной пыли.

При этом факел принят одномерным, время воспламенения топлива считается пренебрежимо малым по сравнению с общим временем его выгорания. Влиянием зольности на горение не учитывается, так как внешняя зола и частично внутренняя отделяются при размоле от горючей части натурального топлива. Считается, что вся влага выделяется при сушке и прогреве частиц и на процесс горения не оказывает влияния. Температура горящих частиц принимается равной температуре газового потока. Порядок химической реакции принимается равным

I по кислороду как компоненту, находящемуся в недостатке. Конечным продуктом горения углерода считается CO_2 .

Данная математическая модель представлена одним обыкновенным дифференциальным уравнением 1-го порядка.

$$\frac{d\delta_i}{dt} = -\frac{P}{RT} \cdot 0.21 \cdot \frac{2 \cdot M_C \cdot V_k^0}{\rho_k \cdot V_r} \cdot \frac{k_i}{1 + \left(\frac{1}{Nu_{Di}}\right) \cdot \frac{k_i \delta_i}{D_i}} \left[(a - 1) \frac{V^0}{V_k^0} + G \right], \quad (1.23)$$

где P – давление в топочной камере, Па; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура поверхности частицы, К; M_C – молярная масса углерода, кг/кмоль; ρ_k – кажущаяся плотность угольной частицы без учета золы и летучих, кг/м³; V^0 – теоретически необходимый объем воздуха для сжигания 1 кг угля, нм³/кг; V_r – объем продуктов сгорания, образующихся при сгорании 1 кг угля, нм³/кг; V_k^0 – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг углерода (8,89 м³/кг); k – константа скорости реакции окисления углерода, взятая при соответствующем значении температуры поверхности частицы топлива, м/с; Nu_D – диффузионное число Нуссельта; D – коэффициент диффузии кислорода в газообразной среде, окружающей частицу, м²/с; G – текущая доля несгоревшего углерода коксового остатка.

Для учета полифракционного состава реального ПУТ предлагается использовать закон распределения частиц по фракциям, например, Розина-Раммлера. При этом в функциональное выражение входят опытные коэффициенты, характеризующие соответственно тонкость помола и равномерность зернового состава (показатель полидисперсности). Они определяются по остаткам на двух характерных ситах (обычно на ситах 90 и 200 мкм).

При этом моделирование ведется для частиц наиболее крупного размера, а далее при помощи интегральных преобразований результат пересчитывается на общий недожог. При таком подходе нет возможности предусмотреть возможность отличающейся средней зольности у частиц различных фракций и вполне вероятных отклонений от принятого закона распределения частиц по фракциям.

Для устранения этого недостатка целесообразно усовершенствовать данный подход к моделированию выгорания частиц ПУТ, представив модель n -ным количеством обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, где n – количество выделенных для рассмотрения фракций.

1.5 Рациональные параметры измельчения

Измельчение твердого топлива для его сжигания в энергетическом котле представляет собой трудоемкую и энергоемкую операцию. Для тонкого измельчения твердого топлива на ТЭС применяют шаровые барабанные мельницы (ШБМ) [38], работающие в открытом и замкнутом циклах (Приложение Г).

Нормальной считается тонкость помола угля, при которой достигаются рациональные условия сжигания угольной пыли в топках котлов при одновременном достижении оптимальной производительности ШБМ. Нормальная работа котлов возможна при подаче в них топлива, размолотого до тонкости помола 8 – 10 % остатка на сите R90 (квадрат с ячейкой 90 мкм) [39-41].

Основными факторами, определяющими необходимую тонкость помола угля, являются:

1) теплотехническая характеристика топлива, характеризующаяся в основном содержанием золы и выходом летучих: чем больше выход летучих в топливе и меньше его зольность, тем грубее может быть его помол. В зависимости от выхода летучих рекомендованная тонкость помола угля ориентировочно может быть определена из уравнения:

$$R_m = 0.6 \cdot V^p; \quad (1.24)$$

где V^p — содержание летучих в рабочем топливе;

2) качество угольной пыли, определяемое по соотношению остатков на тонких и грубых ситах.

Крупность дробления (операции предшествующей измельчению) существенно влияет на процесс размола угля [42], сушку его в сушильно-

помольной системе и надежность работы пылеугольной установки. Повышенная крупность топлива снижает производительность мельницы [43], повышает расход электроэнергии и увеличивает износ мелющих тел. Обычно рекомендованными являются следующие показатели гранулометрического состава топлива, поступающего на помол: остаток на сите 5 мм не более 20%.

В теплоэнергетике для совмещения операций сушки и помола твердого топлива влажностью 8-15 % применяют его предварительную подсушку в шаровых барабанных мельницах [44].

Шаровая барабанная мельница, в которой одновременно происходит сушка и помол угля, весьма надежна в работе при размоле твердых углей и может давать большую производительность [45]. Для размолы твердых углей в ЦКТИ было создано два типа шаровых барабанных мельниц ШБМ-380/640 и ШБМ-400/800 с часовой производительностью по АШ 50 т. Мельницы снабжены прямым приводом роликов от фрикционной передачи и потому не имеют редуктора. В этих мельницах можно применять сушильный агент с высокой температурой.

Сушильный агент, необходимый для сушки топлива в шаровой барабанной мельнице, поступает из топки через отдельный газоход или из воздуховода горячего воздуха [46].

Для создания высоких скоростей в трубопроводах при значительном насыщении парами применяется поддув, т. е. возврат газозооной смеси в трубопроводы за мельницей [47]. Шаровые угольные мельницы работают в замкнутом цикле с центробежными или воздушно-проходными сепараторами [48].

В такой мельнице осуществляются подсушка и помол угля различных марок или смеси углей с начальной влажностью до 15%. Мельница, сепаратор, циклон и мощный вентилятор последовательно соединены между собой воздухопроводом. При работе вентилятора во всей системе создается разрежение. Предварительно раздробленный влажный уголь поступает в мельницу из бункера через ее загрузочную цапфу. Сюда же подается горячий газ из топки или воздух из горячего воздуховода. Уголь в мельнице подсушивается и измельчается. Поток

воздуха измельченные частички выносятся по трубопроводу в сепаратор, в котором из потока выделяются крупные зерна угля и направляются по трубе обратно на размол в мельницу. Газовый поток с взвешенными в нем частичками размолотого угля направляется в циклон, где угольная пыль осаждается и затем поступает в бункер готовой пыли.

Мельчайшие фракции пыли, не осевшие в циклонах (примерно 10 — 15% от веса всей пыли), выносятся из них воздушным потоком и направляются непосредственно в топку котла.

Для высоковлажных и мягких материалов размольная производительность мельницы обычно превышает ее сушильную производительность [49], а для маловлажных и твердых материалов, наоборот, сушильная производительность выше размольной.

Тонкость помола угля в ШБМ регулируется путем настройки сепаратора. При прочих равных условиях повышение тонины помола приводит к снижению производительности мельницы и повышению энергоемкости операции. В каждом конкретном случае выбор рациональных параметров измельчения обычно производится экспериментально путем подбора [50]. Очевидно, что для решения этой задачи целесообразно было бы использовать научно обоснованные методики расчета или математические модели.

1.6 Рациональные параметры горелок

Основная задача горелочного устройства заключается в обеспечении качественного перемешивания пыли и воздуха, и соответственно, возможно более раннего воспламенения пылевоздушной смеси, что определит практически полное выгорание топлива [51]. Наибольшее распространение для реализации камерного (факельного) сжигания твердого топлива получили вихревые круглые, а также прямоточные щелевые и сопловые пылеугольные горелки [52].

Вихревыми называют пылеугольные горелки [53], в конструкции которых для закручивания первичного и вторичного воздуха предусмотрены специальные

завихрители (Приложение Д) [54]. Для закручивания потоков применяются улитки, устанавливаемые на входе в горелку, или лопатки, расположенные в горелке аксиально или тангенциально в потоке первичного или вторичного воздуха.

Название пылеугольные горелки обусловлено способом ввода первичного (с пылью) и вторичного воздуха. Так, в прямоточно-улиточной горелке первичный воздух с пылью через центральную трубу подается без закручивания (прямоточно). Вторичный воздух, подаваемый в топку через горелку, закручивается улиткой [55]. Конструкция такой горелки (одноулиточная горелка). Аэросмесь поступает в топку через центральную трубу, имеющую на конце чугунный наконечник. Для регулирования выходного сечения аэросмеси применяется конус-рассекатель, который может перемещаться.

Хорошее раскрытие пылевоздушной струи обеспечивается благодаря наличию конуса-рассекателя, а также подсосу горячих топочных газов к корню факела, что интенсифицирует воспламенение топлива. Вторичный воздух подается через улитку и выходит в топку в виде завихренного потока через кольцевое пространство между наконечником и обмуровкой. Дополнительно, как правило, предусматривается установка мазутной форсунки, используемой для растопки, а также при необходимости подсвечивать пылеугольный факел.

В вихревых горелках, мазутные форсунки установлены по центру горелки. В прямоточных щелевых горелках подача в топку аэросмеси и вторичного воздуха осуществляется отдельно через узкие щели. Такие пылеугольные горелки выполняются с внешним и с внутренним вводом вторичного воздуха. Для прямоточных сопловых горелок характерен ввод аэросмеси и вторичного воздуха отдельно через круглые сопла.

Примером прямоточной щелевой горелки является широко используемая поворотная горелка. В ней аэросмесь вводится через центральный патрубок, а далее через поворотные сопла-щели выходит в топку. Вторичный воздух поступает в топку по наружному соплу. Сопла при помощи электродвигателя

можно поворачивать вверх и вниз от горизонтальной плоскости на $12 - 20^\circ$. Это дает возможность менять положение факела в топке [56].

При сравнении вихревых и прямоочных горелок необходимо отметить следующее. В вихревых горелках благодаря улиточному подводу воздуха и наличию конуса-рассекателя к выходящей пылевоздушной струе добавляется дополнительная составляющая скорости, перпендикулярная оси горелки. При этом выходящая из горелки струя имеет форму полого гиперboloида вращения. В его центральной части образуется зона разрежения, что приводит к непрерывному подосу сюда высокотемпературных топочных газов и обеспечивает интенсивное воспламенение пылевоздушной смеси. На внешней поверхности конуса воспламенение струи тормозится из-за наличия прослойки относительно холодного вторичного воздуха, которая находится между пылевоздушной смесью и горячими топочными газами. Кроме того, здесь сказывается и охлаждающее влияние экранных поверхностей нагрева. В отличие от вихревых турбулентных горелок в прямоочных горелках разнос пылевоздушной струи отсутствует. Факел получается более дальнoбойным. Для горелки с внешним вторичным воздухом зажигание струи происходит по внешней ее поверхности. Благодаря наличию в этой области вторичного воздуха, охватывающего пылевоздушную струю, несколько затрудняется прогрев и воспламенение смеси. Более целесообразна схема прямоочной горелки с внутренним подводом вторичного воздуха, при этом улучшаются условия воспламенения пылевоздушной смеси.

В значительной мере условия воспламенения пылегазовой смеси, интенсивность горения и длина факела определяются соотношением первичного и вторичного воздуха, а также их скоростей на выходе из горелки [57]. Количество первичного воздуха целесообразно уменьшать для ускорения воспламенения топлива. Особенно целесообразно уменьшение доли первичного воздуха при сжигании низкорeакционных трудновоспламеняемых углей (антрацит, полуантрацит, тощий уголь). Минимально возможное количество первичного воздуха определяется условиями транспорта пыли через горелку. Для сжигания низкорeакционных углей количество первичного воздуха следует

принимать не более 20 % общего количества, а для сжигания бурых углей до 40-45 % [58].

Кроме указанных пылеугольных горелок тепловой мощностью 25 и 35 МВт, в соответствии с ОСТ 108.030.26-78 [59] для котлов большой производительности имеются пылеугольные горелки мощностью 50, 75, 100, 135 и 150 МВт. Для этих горелок скорости первичного и вторичного воздуха должны быть более высокими. Для улучшения воспламенения пылегазовой смеси при работе прямоточных горелок применяются повышенные скорости выхода в топку первичного и вторичного воздуха (27-30 м/с). Также повышенные скорости выхода воздуха в топку (35-45 м/с) применяются для сбросных горелок [60], через которые в топку вводятся тончайшая угольная пыль, не уловленная в циклоне, и транспортирующий ее из мельницы сушильный агент – воздух.

Зачастую выбор более подходящих конструкций горелок и определение их рациональных конструктивных параметров производятся экспериментально в условиях конкретного энергетического котла. При условии внедрения на ТЭС математической модели выгорания топлива, после изменения параметров горелок становится вопрос адаптации модели к новым условиям. Для решения этой задачи должна быть разработана обоснованная и формализованная научная методика.

1.7 Газоплотные топки

В последние годы широкое распространение получили котлы с газоплотными ограждениями (Рис. 1.2) [61]. Принцип газоплотности легче реализуется при выполнении топочных экранов из вертикальных панелей с одноходовым движением рабочей среды. Такая возможность появляется в котлах высокой производительности.

Газоплотные ограждения позволяют существенно повысить экономичность и надежность оборудования [62]. Базовые преимущества газоплотных топок заключаются в следующем:

- отсутствуют присосы в топку и газоходы (снижение q_4);

- снижается расход энергии на транспортировку воздуха и продуктов сгорания;
- появляется возможность реализации рационального режима сжигания с малыми избытками воздуха;
- заменяется тяжелая обмуровка на легкую тепловую изоляцию (снижаются потери теплоты);
- облегчаются очистка топки от шлака и сажи обмывкой экранов водой без повреждения обмуровки.

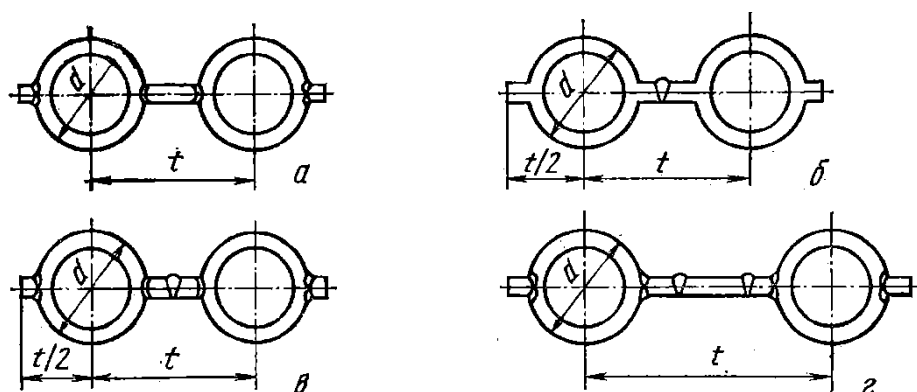


Рис. 1.2. Типы сварных соединений труб в газоплотные панели:

- а – сварное соединение (труба – мембрана – труба), б – сварное соединение (плавниковая труба – плавниковая труба), в – сварное соединение (оребрённая труба – оребрённая труба), г – сварное соединение (оребрённая труба – мембрана – оребрённая труба)

Применение наддува предъявляет ряд требований к конструкции котла [63]:

- предпочтительно однокорпусное его исполнение, уменьшающее удельную поверхность дорогостоящих газоплотных стенок; ограждение топки и газоходов сварными экранными панелями;
- уменьшение числа автономных регулируемых потоков рабочей среды, позволяющее наряду с другими достоинствами, общими для котлов всех типов, обеспечить минимальный объем сложной герметизации в местах прохода труб через газоплотные стенки;

- уменьшение размера фронта топочной камеры и соответствующее увеличение глубины и высоты (сокращение числа последовательно включенных, но свариваемых параллельно между собой экранных панелей);

- в целях уменьшения разности температур между свариваемыми панелями рециркуляция рабочей среды в настенных поверхностях нагрева и байпасирование ее мимо обогреваемых поверхностей нагрева.

В котлах с наддувом выход труб пароперегревателя выполняют через сварные панели потолка [37], имеющего второе перекрытие. Конвективные пакеты промпрегревателя располагают в опускном газоходе горизонтально и для уменьшения влияния возможных температурных неравномерностей его секционируют по ширине газохода на автономные параллельные потоки. Все стены конвективной шахты также покрыты газоплотными экранами из труб экономайзера или пароперегревателя.

Экономайзер, ТВП и РВП в основном выполняют такими же, как и для котлов, работающих с уравновешенной тягой. Особенностью условий работы каркаса является восприятие усилий от наддува поясными балками, расположенными на расстоянии около 3 м друг от друга [65].

Современные крупные агрегаты конструируются таким образом, что основной несущий каркас котла совмещается с каркасом здания. При этом совмещении достигается заметная экономия металла, например для газомазутного котла ТГМП-204 около 1500 т на один энергоблок мощностью 800 МВт. Такая конструкция применяется на новых котлах энергоблоков мощностью 500, 800 и 1200 МВт, не только газомазутных, но и пылеугольных [65].

В традиционных конструкциях, когда экранные поверхности нагрева располагаются вдоль ограждающих стен топки, габариты агрегата получаются очень большими. Возможными путями уменьшение габаритов являются высокофорсированные вихревые топки, интенсификация теплообмена рабочих поверхностей нагрева и их развитие.

По результатам анализа изменения картины протекания физико-химических процессов после перехода на газоплотные топки есть основания полагать, что

такая реконструкция позволит не только уменьшить потери теплоты с уходящими газами, но и сократить величину механического недожога. Для проверки этого предположения необходимо провести соответствующие исследования. Их важность заключается в том, что на основании результатов, полученных с их помощью, с учетом известных закономерностей появится возможность принимать обоснованные решения о целесообразности перехода на газоплотные топки и выборе конкретных параметров реконструкции (переход на полностью или частично газоплотные топки).

1.8 Технология плазменной безмазутной растопки пылеугольных котлов

Для розжига пылеугольных котлов и стабилизации процессов горения обычно применяют природный газ или мазут, стоимость которых непрерывно растет. Поэтому актуальным является использование в качестве растопочного топлива угольной пыли, которая по сравнению с газом и мазутом требует более высокой температуры воспламенения и более длительного температурного воздействия, вследствие низкого выхода летучих по сравнению с газом и мазутом. Высокую ударную температуру (до 12000 К) способны развивать плазмотроны [67-72].

Для решения проблемы высокоэффективного использования низкосортных твердых топлив при минимальном отрицательном воздействии на окружающую среду в 1983 году по предложению ведущих специалистов в области плазменной техники и технологии М.Ф.Жукова, Л.С. Полака и др. [73-77], поддержанному Госкомитетом по науке и технике, в ряде научных учреждений начаты работы по созданию принципиально новой – плазменной технологии сжигания пылевидного топлива с помощью электродуговых нагревателей газа – плазмотронов (Рис. 1.3) [73].

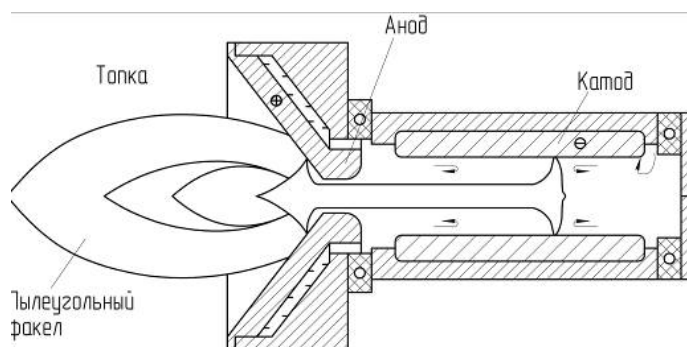


Рис. 1.3. Схема электродугового плазмотрона с медными водоохлаждаемыми электродами, предназначенного для установки в пылеугольной горелке котла.

Благодаря воздействию плазмы на угольную пыль достигается ряд улучшений: частицы угля дробятся на более мелкие части, происходит их интенсивная газификация, вследствие этого повышаются реакционные свойства топлива, горение протекает более устойчиво. Это является актуальным при сжигании низкосортных углей (при постоянной работе плазмотрона) и позволяет осуществить растопку котла при кратковременной, необходимой для достижения растопочных параметров котла, работе плазмотрона. По разным оценкам электрическая мощность, потребляемая плазмотроном, не превышает 2,5% от тепловой мощности пылеугольной горелки, и составляет 0,3-0,5% от тепловой мощности котла. Однако применяемые электродуговые плазмотроны обладают существенными недостатками – износом электродов и необходимостью их охлаждения.

Перспективным направлением является использование СВЧ-плазмотронов в таких горелках, так как для них не требуется использование специальных угольных и медных электродов. Еще одно преимущество заключается в том, в них возможно создание критической концентрации электронов, а это способствует раннему воспламенению холодной углевоздушной смеси и при относительно малых временах взаимодействия угольных частиц с плазменным факелом ($\sim 0,05$ с) интенсивному выгоранию [77].

В результате испытаний доказано, что плазменные технологии безмазутной растопки котлов и стабилизации факела имеют следующие преимущества перед традиционными технологиями:

- сокращение расхода мазута и газа на ТЭС;
- энергетическая эффективность плазменно-топливных систем – в 3-4 раза выше, т. к. относительная электрическая мощность плазмотронов составляет (в зависимости от типа угля и горелки) лишь 0,5-2% от тепловой мощности пылеугольной горелки;
- замещение стабилизирующего топлива (мазута или природного газа) углем позволяет снизить образование оксидов азота на 40-50% из-за преобразования топливного азота в молекулярный азот в обедненных кислородом зонах воспламенения и сжигания, выделения оксидов серы снижается на 30-40% (если углем замещается высокосернистый мазут), а выбросы пятиокси ванадия подавляются почти полностью;
- снижение эмиссии диоксида углерода благодаря повышению эффективности процесса сжигания на пылеугольных котлах в результате уменьшения мехнедожога топлива;
- возможность растопки энергетических блоков ТЭС при потере собственных паровых нужд станции;
- использование широкой гаммы энергетических углей, лигнита, горючего сланца, торфа, биомассы и их смесей при сохранении технических, экономических и экологических показателей энергетических блоков.

Промышленная реализация плазменно-угольной технологии сдерживается существенной проблемой, которая заключается в необходимости использования мощных плазмотронов (не менее 200 кВт) [76]. Мощность плазмотрона может быть определена как минимальные относительные затраты энергии, равные отношению тепловых мощностей плазмотрона и пылеугольной горелки. Для АШ эта величина составляет 1,5 – 2,0 %. Реально достигаемый ресурс работы таких плазмотронов (при непрерывной работе) составляет не более 200 - 300 часов. Сегодня не видны пути существенного повышения ресурса медных электродов.

Другие, способные реально обеспечить значительно больший ресурс, это: самовосстанавливающийся из газовой фазы катод, вольфрамовый, расходуемый графитовый – применительно к энергетике не рассматриваются [77]. Таким образом, плазменно-угольная технология является необычайно перспективным направлением, но для ее распространения необходимо решение технических проблем, связанных с повышением стойкости элементов плазмотронов. Такая задача может быть решена исключительно в виде трансдисциплинарного исследования в рамках материаловедения, электротехники и теплоэнергетики.

Из анализа системы топливоподачи энергоблока можно сделать вывод, что и помимо плазменной технологии имеется возможность обеспечения выхода хотя бы некоторой доли летучих из угля и повышения реакционной способности топлива за счет обеспечения предварительного теплового контакта пыли из бункера с горячим первичным воздухом, идущим на горелку. Однако этот вопрос требует отдельного исследования.

1.9 Использование анаклариды при сжигании твёрдого топлива

Анамегаторы (Анаклариды) – это семейство жидких веществ, предназначенных для модификации обычных промышленных топлив (таких, как природный газ, мазут и уголь) и топлив для автомобилей (дизель, бензин) [79]. Эффективность процесса сгорания увеличивается, после этой модификации потребление стандартных топлив и температура газов уноса сокращаются. Добавляются в жидкие топлива – прямо в ёмкости для хранения или расходные баки. Объёмная модификация, даёт возможность распылить его в более мелкой дисперсии, увеличивая скорость и качество процесса горения. Более того, это позволяет избавиться от донных отложений ёмкостей хранения и абсорбировать водное «зеркало» с поверхности. В газ и уголь — в систему подачи первичного (вторичного) воздуха горелки, что избавляет от необходимости изменять существующее оборудование. Применение анамегаторов позволяет сэкономить: 6 - 9 % топлива. Анамегаторы являются зарегистрированными торговыми марками,

все оригинальные формулы защищены международными патентами. Все права защищены.

Анакларид "РА-ГЕН-Ф" – бесцветная однородная жидкость, ее плотность при температуре 20°С составляет 0,8— 0,92 г/см³. В эту добавку входят вода, изопропиловый спирт и карбамид. Эмпирическая формула: $(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{H}_2\text{O} + (\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$. Состав анакларида "РА-ГЕН-Ф" является ноу-хау фирмы разработчика и рекомендуется для интенсификации выгорания натуральных топлив при вводе их в топочные устройства энергетических котлов [80]. Схема ввода анакларида в котел энергоблока представлена на рисунке 1.4.

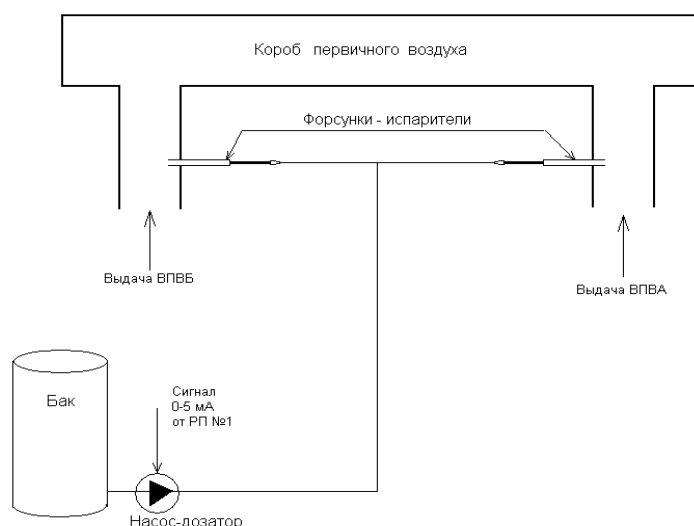


Рис. 1.4. Схема ввода анакларида в котел энергоблока.

При подаче во вторичный воздух спиртосодержащего анакларида при температуре 350 - 380 °С образуются продукты распада (в результате пиролиза), имеющие определенное количество свободных атомов O_2 и H_2 и радикалов OH (активных центров). Они вступают в разветвленные цепные реакции, как при горении выделившихся летучих, так и на поверхности коксовых частиц [81]. При таком механизме взаимодействия анакларида с топливовоздушной смесью на начальном участке развития факела его (анакларид) можно рассматривать, как привнесенный извне активатор горения. Анаклариды имеют очищающие свойства. Благодаря их использованию зола, пыль и несгоревшие остатки топлива получают такой же электростатический заряд, что и внутренние поверхности печи или котла, что приводит к очистке от старых нагаров (через 4-7 дней). Это

улучшает теплопередачу, увеличивает эффективность печи и продлевает срок службы топочного оборудования [82].

Использование анакларидов позволяет повысить скорость цепной реакции горения и достичь значительного улучшения горения углеводородов, что приводит к повышению температуры ядра пламени, уменьшению длины факела и увеличению доли теплопередачи в виде излучения. Эти улучшения позволяют уменьшить удельное потребление любых природных топлив и сократить загрязнение (CO , CO_2 , SO_2 , N_{ox}) атмосферы [83, 84].

Практические данные о достижении существенных положительных результатов при использовании анакларидов на энергетических котлах, сжигающих ПУТ, отсутствуют. По этой причине такое направление совершенствования технологии в данном диссертационном исследовании не рассматривается.

1.10 Результаты внедрения сжигания топлива на котлах с умеренным контролируемым химическим недожогом

Известна технология, реализующая способ сжигания топлива с умеренным контролируемым химическим недожогом, позволяющая уменьшить эмиссию оксидов азота на 20÷40% и повысить КПД брутто и нетто котла [81].

На кафедре Парогенераторостроения МЭИ разработан новый малозатратный, быстрореализуемый способ сжигания топлива с недожогом [81, 85]. Метод не требует большого объёма реконструкции, может быть внедрён силами собственного персонала ТЭС. Он позволит не только снизить эмиссию оксидов азота, но и улучшить эффективность работы как котла в частности, так и котельной установки в целом.

Логическим усовершенствованием способа сжигания топлива с низкими избытками воздуха является реализация способа сжигания с умеренным недожогом [86]. Эта технология предполагает снижение количества организованно подаваемого воздуха в топку. Как известно, с уменьшением

количества кислорода в факеле происходит подавление образования термических и топливных оксидов азота. По этой же причине будет наблюдаться рост концентраций продуктов химического недожога.

Уменьшение избытка воздуха α одновременно сопровождается снижением потерь теплоты с уходящими газами q_2 и увеличением потерь теплоты с химическим q_3 и механическим q_4 недожогом. В результате КПД котла в зависимости от уровня недожога может увеличиваться или уменьшаться [87].

Практические результаты внедрения технологии сжигания топлива с химическим недожогом при сжигании природного газа даны на рис. 1.5. Из представленных данных очевидно устойчивое снижение концентрации оксидов азота в уходящих газах котлов при снижении коэффициента избытка воздуха [88].

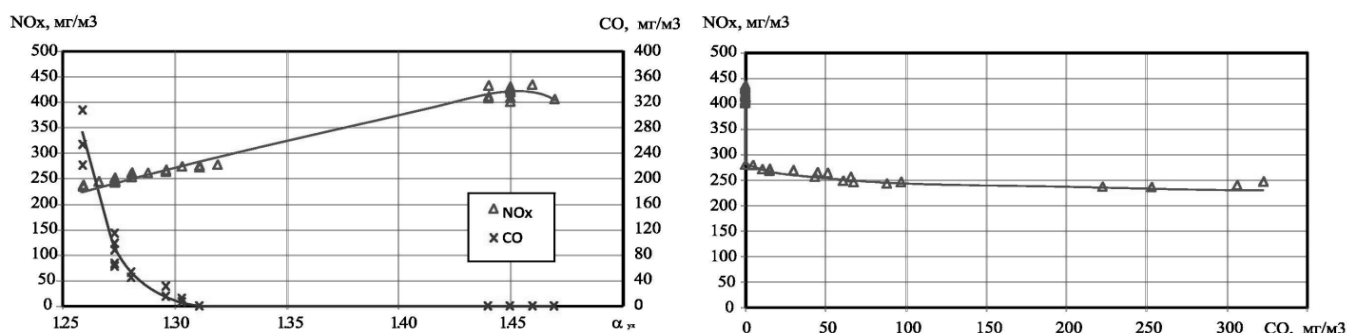


Рис. 1.5. Эмиссия оксидов азота и монооксида углерода в зависимости от коэффициента избытка воздуха: котёл БКЗ-75-3,9ГМ (ст. №14 ТЭЦ ЧМЗ г. Глазова), $D=75$ т/ч.

При снижении избытка воздуха от режимных (по режимной карте) $\alpha_{\text{реж}}$ до критических значений $\alpha_{\text{кр}}$ (избытка воздуха, при котором появляется химический недожог, т.е. начинает наблюдаться СО в продуктах сгорания) ΔNO_x составляет 10÷20%. Дополнительное снижение α , при котором в продуктах сгорания концентрация СО повышается до 300 мг/м³ (что допускается ГОСТ Р 50831-95 [89]) даёт добавочное снижение выхода NOx на 10÷20%. Для большинства котлов итоговое снижение концентрации оксидов азота лежит в пределах 20÷40%.

Наличие продуктов химического недожога является общим для всех исследованных ранее котлов [83, 90]. Поэтому в качестве одного из показателей эффективности метода принята концентрация СО в уходящих газах котла.

Согласно известным результатам экспериментов при снижении до определённых значений коэффициент избытка воздуха рост потерь энергии с химическим недожогом меньше, чем снижение потерь теплоты с уходящими газами. Исходя из этого, сделан вывод, что минимальные суммарные потери теплоты с уходящими газами и химическим недожогом (q_2+q_3), а значит, и минимальный расход топлива на котёл, будут наблюдаться при сжигании топлива с умеренным химическим недожогом в области пониженных избытков воздуха (при концентрации СО в уходящих газах за котлом до 100 мг/м^3).

Оптимальные условия реализации предложенного способа достигаются при умеренном химическом недожоге при концентрации СО в уходящих газах от 50 до 200 мг/м^3 в зависимости от вида сжигаемого топлива. КПД котла при этом достигает максимума благодаря снижению потерь теплоты с уходящими газами q_2 и увеличивается на 0,5-1% по сравнению с обычными режимами сжигания.

Суммарная вредность продуктов сгорания при реализации способа сжигания с умеренным недожогом, несмотря на увеличение концентрации продуктов недожога топлива (СО до $100\div 200 \text{ мг/м}^3$ и бензопирена БП до $70\div 100 \text{ нг/м}^3$), уменьшается в 1,3-2 раза за счёт заметного снижения эмиссии NO_x .

Описанное выше направление совершенствования технологии сжигания не получило на данный момент общего признания и в данной работе не рассматривается.

Выводы по разделу 1

В результате выполнения литературного анализа сделан вывод, что, несмотря на появление и интенсивное развитие парогазовых ТЭС, реализующих бинарные циклы, и технологий сжигания твердого топлива в циркулирующем кипящем слое, традиционные ТЭС, реализующие сжигание угля в пылевидном

состоянии еще несколько десятилетий будут играть существенную роль в мировой энергетике. Поэтому задача совершенствования технологии сжигания ПУТ в топках энергетических котлов сохраняет свою актуальность.

Обоснована необходимость усовершенствования известной упрощенной математической модели выгорания пылеугольного топлива в топке энергетического котла для обеспечения возможности учета реального фракционного состава топлива. При этом показана важность исследования параметрической чувствительности модели для обеспечения возможности ее практического использования. Обоснована необходимость разработки формализованного способа адаптации математической модели выгорания пылеугольного топлива для учета особенностей технологии сжигания.

Сделан вывод о важности проведения теоретического и экспериментального исследования влияния предварительной тепловой обработки пылеугольного топлива, достигаемой за счет обеспечения предварительного контакте угольной пыли и горячего воздуха при переврезки пылепровода высокой концентрации, на глубину выжигания.

Обоснована необходимость исследования влияния степени газоплотности топки на глубину выжигания ПУТ для обеспечения возможности выбора рациональных параметров топки при реконструкции парогенераторов или создании новых.

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Математическая модель выгорания полифракционного факела

В литературном обзоре была обоснована необходимость усовершенствования известной упрощенной математической модели выгорания пылеугольного топлива в топке энергетического котла для обеспечения возможности учета реального фракционного состава топлива. Эта задача решается в данном подразделе диссертационной работы.

В известной упрощенной математической модели моделирование ведется либо для частиц одного размера, либо в случае необходимости учета полифракционного состава топлива для частиц наиболее крупного размера, а далее при помощи интегральных преобразований результат пересчитывается на общий недожог. При таком подходе нет возможности предусмотреть возможность отличающейся средней зольности у частиц различных фракций и вполне вероятных отклонений от принятого закона распределения частиц по фракциям.

Предложена математическая модель выгорания полифракционного пылеугольного топлива в топке энергетического котла. Она базируется на рассмотрении системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих изменение размера частиц каждой из выделенных для рассмотрения фракций. При этом парциальное давление кислорода в каждый момент времени определяется на основании рассмотрения одновременного выгорания частиц всех фракций. Каждое из уравнений имеет вид, предложенный в работе [37].

Для составления модели по опыту работы [37] использованы следующие допущения:

1. Так как горение крупных и средних пылинок, определяющих механическую неполноту сгорания, протекает в условиях, при которых имеется известная однородность свойств по сечению факела, то принимается одномерная (по длине факела) схема выгорания.

2. Время воспламенения топлива пренебрежимо мало по сравнению с общим временем его выгорания, которое определяется длительностью горения крупных частиц коксового остатка.

3. Влиянием зольности на горение можно пренебречь, так как внешняя зола и частично внутренняя отделяются при размоле от горючей части натурального топлива. Таким образом, рассматривается горящая частица, состоящая из углерода кокса.

4. Влага выделяется при сушке и прогреве частиц и на процесс горения не оказывает влияния.

5. Температура частиц принимается примерно равной температуре газового потока.

6. Порядок химической реакции принимается равным I по кислороду как компоненту, находящемуся в недостатке.

7. Считается, что конечный продукт сгорания — CO_2 , т. е. можно пренебречь влиянием горения CO в пределах пограничного слоя (негорящий пограничный слой).

8. Не учитывается роль восстановительной реакции и внутренних реакций.

Таким образом, составленная математическая модель представлена системой из n обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{d}{d\tau} \delta_i(\tau) = -\frac{P}{R \cdot T} \cdot \frac{2 \cdot M_c}{\rho_k} \cdot \frac{k}{1 + \frac{1}{N_{uD}} \cdot \frac{k \cdot \delta_i(\tau)}{D}} \cdot O_2(\delta_1(\tau), \dots, \delta_n(\tau)) \quad (2.1)$$

$$(i = \overline{1, n}), \quad (\tau \in [0, \tau_*]);$$

и начальными условиями

$$\delta_i(0) = \delta_i^{(0)} \quad (i = \overline{1, n}), \quad (2.2)$$

где $\delta_i(\tau)$ ($i = \overline{1, n}$) – значения размера частиц i -ой фракции, м;

P – давление в топочной камере, Па;

R – универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К);

T – текущее значение температуры поверхности частицы, К;

ρ_k – кажущаяся плотность угольной частицы без учета золы и летучих, кг/м³;

M_C – молярная масса углерода, кг/кмоль;

k – константа скорости реакции окисления углерода, взятая при соответствующем значении температуры поверхности частиц топлива, м/с;

Nu_D – диффузионное число Нуссельта;

D – коэффициент диффузии кислорода в газообразной среде, окружающей частицу, м²/с;

n – число выделенных для рассмотрения фракций;

$\delta_i^{(0)}$ ($i = \overline{1, n}$) – начальные значения размера частиц i -ой фракции, м;

$O_2(\delta_1(\tau), \dots, \delta_n(\tau))$ – текущая концентрация кислорода в газовом потоке, дол. ед.;

τ – время;

τ_* – предельное время пребывания частиц в топочном пространстве, ограничивающее временной диапазон корректности получаемых на основании представленной модели решений.

Текущая концентрация кислорода в газовом потоке определяется как

$$O_2(\delta_1(\tau), \dots, \delta_n(\tau)) = 0,21 \cdot \frac{(\alpha - 1) \cdot V^{(0)} + G(\delta_1(\tau), \dots, \delta_n(\tau)) \cdot V_k^{(0)}}{V_r}, \quad (2.3)$$

где $G(\delta_1(\tau), \dots, \delta_n(\tau))$ – текущая доля несгоревшего углерода, дол. ед.;

$V^{(0)}$ – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг угля, нм³/кг;

V_r – объем продуктов сгорания, образующихся при сгорании 1 кг угля, нм³/кг;

$V_k^{(0)} = 8,89$ – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг углерода, нм³/кг;

α – коэффициент расхода воздуха для сжигания топлива, дол. ед.

Текущая доля несгоревшего углерода коксового остатка частиц в каждый момент времени определяется как отношение массы углерода коксового остатка

всех еще не сгоревших частиц к исходной массе углерода коксового остатка в момент начала его горения

$$G(\delta_1(\tau), \dots, \delta_n(\tau)) = \frac{\rho_k \cdot (\pi/6) \cdot \sum_{i=1}^n (\chi_i \cdot \delta_i(\tau)^3)}{G_H}, \quad (2.4)$$

где G_H – начальное значение массы углерода в 1 кг исходного топлива, кг;

χ_i – число частиц топлива i -й фракции с размером $\delta_i(\tau)$, соответствующее 1 кг исходного топлива.

Предельное время пребывания частиц в топочном пространстве τ_* определяется следующим выражением [93]

$$\tau_* = \frac{V_T}{B \cdot V_r} \cdot \frac{273}{T_\phi}, \quad (2.5)$$

где V_T – объем топки котла, м³;

B – расход топлива на котел, кг/с;

T_ϕ – средняя температура факела, К.

Оценка времени пребывания топлива в топке при помощи выражения (2.5) для одной из типичных конструкций энергетических котлов на постсоветском пространстве – ТП-100 – при номинальной тепловой нагрузке показала, что оно составляет порядка 3,3 с.

Численная реализация составленной математической модели проведена при помощи метода Эйлера-Коши. Временной шаг для решения системы уравнений подобран при помощи вспомогательных численных экспериментов таким образом, что его дальнейшее уменьшение в два раза приводит к уточнению результата не более, чем на 0,1%. Такой подход позволил остановиться на количестве временных шагов 10000.

Проведение большого количества численных экспериментов, в которых входящие величины варьировались в пределах соответствующих физике протекания процесса, а также реальным конструктивным и технологическим параметрам объекта исследования показало, что во всех случаях составленная система уравнений имеет решение.

Проведение численных экспериментов для типовых условий эксплуатации котлов ТП-100 Старобешевской ТЭС

В качестве средней температуры факела, на основании данных [37] выбрано значение 1820 К. Превышением температуры частицы над температурой факела, вызванным тем, что выделение теплоты происходит на поверхности частицы, для мелких частиц согласно рекомендации [37, 91] в первом приближении пренебрегаем. Значение константы скорости реакции горения углерода до углекислоты выбрано по опыту работы [37, 91] для антрацита. Для температуры 1820 К, оно составляет $k=4.5$ м/с. Значение коэффициента диффузии кислорода в газообразной среде азота, углекислоты и водяных паров по опыту работы [37, 91] принято на уровне $4,5 \cdot 10^{-4}$ м²/с.

Численные эксперименты по исследованию выгорания полифракционной пыли проведены для условий котла ТП-100 Старобешевской ТЭС. Состав угля, поступающего на горелки котла, %: $C^r=90$; $H^r=4$; $N^r=0,94$; $O^r=4$; $S^r=1,06$; $A^c=19$; $W^p=0,7$.

Объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг угля заданного состава, и удельный выход продуктов сгорания в действительных условиях определены при помощи стандартных расчетных зависимостей, используемых в теории горения топлива [92]: $V^0=7,367$ м³/кг, $V_r=9,069$ м³/кг.

В первом приближении для расчета использованы данные ситового анализа пыли от пробы, отобранной после мельницы из раздаточного бункера (см. таблицу 2.1).

Таблица 2.1. Ситовый анализ пыли, отобранной из раздаточного бункера.

№ п/п	Класс крупности, мм	Массовая доля, %
1	0,16-0,125	2,1
2	0,125-0,063	11,9
3	0,063-0,040	10,4
4	0,040-0	75,6
Итого		100,0

Для каждой из четырех выделенных для рассмотрения фракций размер частиц принят как среднее арифметическое минимального и максимального размеров согласно соответствующему классу крупности. Форма всех частиц принята сферической. Выбранные средние размеры частиц использованы для задания начальных условий для каждого из дифференциальных уравнений, входящих в составленную систему. Также с учетом среднего принятого размера частиц и исходной плотности угля определено число частиц топлива в каждой фракции, приходящееся на 1 кг угля.

В результате проведения численного эксперимента получены кривые, описывающие изменение расчетного для каждой фракции размера частиц топлива (рис. 2.1).

Остаточное содержание углерода после завершения процесса горения составляет 0,61%, а механический недожог $q_4=0,739\%$.

Как видно из рис. 2.1 частицы 3-й и 4-й фракций успевают полностью выгореть в течение пребывания топлива в топке, а для 1-й и 2-й фракций углерод частиц не успевает полностью выгореть. При этом необходимо учесть, что массовая доля 1-й фракции составляет всего лишь 2,1%, а для 2-й фракции она намного более существенна (11,9%) и требует более глубокого рассмотрения.

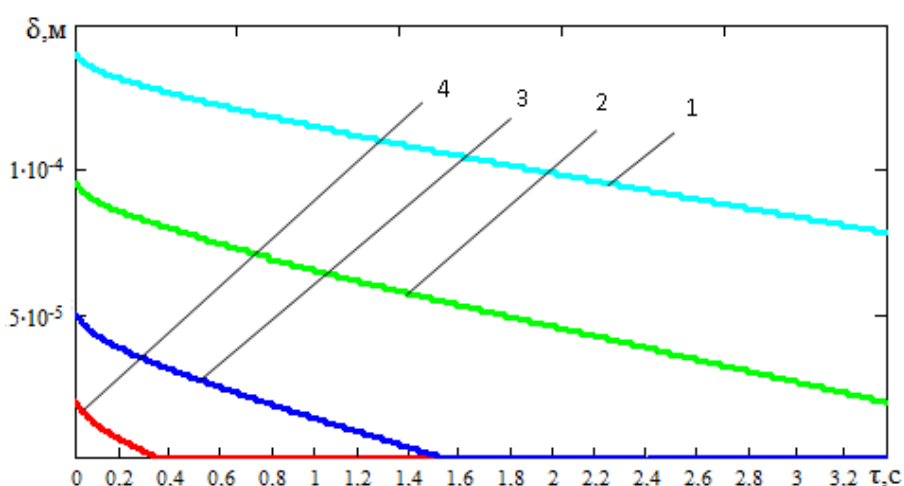


Рис. 2.1. Изменение размеров частиц выделенных для рассмотрения фракций в процессе сжигания ПУТ: 1 – исходный размер 140 мкм; 2 – 90 мкм; 3 – 50 мкм; 4 – 20 мкм.

Для иллюстрации влияния количества рассматриваемых классов крупности 2-я фракция условно разбита на три составляющие со средними размерами: 3 – 74 мкм, 4 – 95 мкм, 5 – 114 мкм и содержанием 4,4 и 3,9%, что соответствует общей массовой доле частиц 2-й фракции – 11,9%. Результаты моделирования выгорания топлива в этом случае представлены на рис. 2.2.

Остаточное содержание углерода после завершения процесса горения составляет 0,71%, а механический недожог $q_4=0,86\%$.

Таким образом, расчетное значение результирующего недожога при прочих равных условиях зависит от того, какое количество фракций выбрано для рассмотрения. Необходимо отметить, что в большинстве случаев реальная величина механического недожога оказывается несколько выше. Причина этого заключается в том, что частицы после попадания в топку должны претерпеть ряд физико-химических трансформаций: выделение и воспламенение летучих, прогрев частиц коксового остатка до воспламенения углерода.

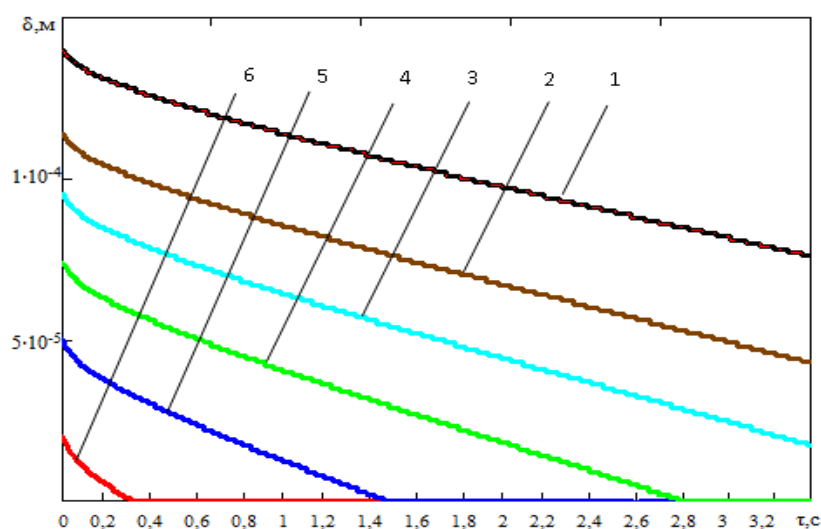


Рис. 2.2. Изменение размеров частиц при увеличенном количестве рассматриваемых фракций: 1 – исходный размер 140 мкм; 2 – 114 мкм; 3 – 95 мкм; 4 – 74 мкм; 5 – 50 мкм; 6 – 20 мкм.

Для низкорекреакционных топлив влияние летучих на процесс воспламенения частиц коксового остатка менее значительно, чем для высокорекреакционных

топлив, однако для получения результатов с достаточной точностью его все же следует учитывать. Таким образом, процесс горения частиц для каждой из рассматриваемых фракций, описываемый предложенной системой уравнений, начинается не с момента попадания частиц в топку, а через некоторое время задержки, которое уходит на прогрев и воспламенение частиц.

Естественно, для каждой из рассматриваемых фракций время задержки имеет свое значение: оно меньше для фракций меньшего размера и наоборот. По предварительным оценкам с использованием зависимостей для расчета нагрева термически тонких тел [92] и теории струйного движения, время задержки на нагрев наиболее крупных частиц до температуры воспламенения (порядка 800 °С) может составлять до 0,35 с. Учет времени задержки воспламенения частиц разных фракций позволит дополнительно повысить точность описания процесса выгорания частиц при помощи усовершенствованной математической модели и упростить процесс ее адаптации на предварительном этапе.

В качестве дополнительных приемов для адаптации модели к конкретным условиям могут быть использованы приемы начальной или оперативной подстройки за счет коррекции значений константы скорости реакции окисления углерода или диффузионного критерия Нуссельта.

Характер изменения остаточного содержания углерода во времени для второго численного эксперимента представлен на рис 2.3.

Как видно из рис. 2.3, скорость выгорания углерода максимальна в начальном периоде пребывания частиц в топке и затем убывает. Эта закономерность объясняется снижением парциального давления кислорода по ходу факела в связи с его расходом на выгорание топлива. Тем не менее, из анализа информации на рис. 2.3б видно, что увеличение времени пребывания топлива в топке на 0,6 с позволило бы снизить недожог на 0,3%.

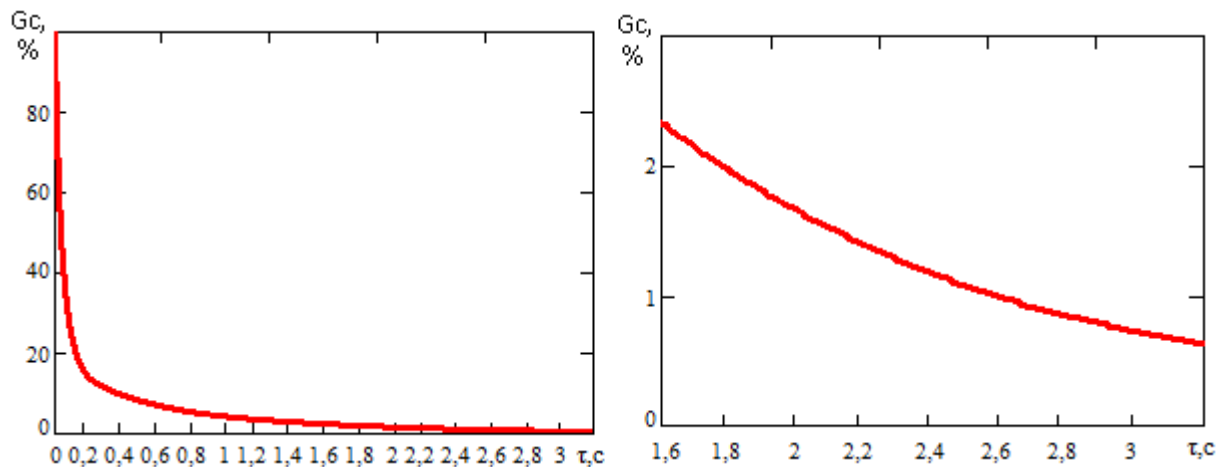


Рис. 2.3. Изменение содержания несгоревшего углерода в общей массе ПУТ, поступившей на сжигание в течение пребывания топлива в топочном пространстве: *а)* – для полного периода времени нахождения топлива в топке; *б)* – для завершающего этапа нахождения топлива в топке.

Таким образом, способ снижения механического недожога, связанный с предварительной активацией низкорекреационного топлива, может быть убедительно обоснован при помощи полученных в данной работе результатов математического моделирования. Действительно, в результате предварительной активации топлива существенно сокращается время задержки на его воспламенение, что позволяет увеличить расчетное время пребывания частиц в топке. Особенно важным этот результат является для частиц крупных фракций.

Таким образом, в данном подразделе диссертационной работы усовершенствована математическая модель выгорания полифракционного пылеугольного топлива в факеле, позволяющая одновременно учесть особенности выгорания каждой из фракций угольной пыли, определяемые ее средним размером и зольностью. Предложенная модель базируется на системе обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих изменение размера частиц каждой из выделенных для рассмотрения фракций.

Доказано существенное влияние количества выделенных для рассмотрения фракций на величину установленного при помощи математической модели механического недожога. Так, при проведении численного моделирования разделение фракции классом крупности 0,125 – 0,063 на три более узкие фракции

с равномерным распределением массы частиц внутри них привело к росту расчетного значения величины механического недожога на 11%.

Обосновано влияние учета времени задержки воспламенения частиц каждой из фракций на уточнение результатов определения величины механического недожога. Эта закономерность совместно с установленным характером изменения во времени доли несгоревшего углерода дополнительно поясняет сущность положительных результатов, достигаемых при предварительной активации низкорекреационного топлива.

2.2 Исследование параметрической чувствительности усовершенствованной математической модели

На основе анализа структуры математической формулировки модели принято решение провести анализ чувствительности модели к точности задания следующих параметров: диффузионное число Нуссельта, коэффициент молекулярной диффузии, расчетная плотность частиц топлива, константа скорости реакции, температура продуктов сгорания.

Численные эксперименты по исследованию выгорания полифракционной пыли проведены для условий котла ТП-100 одной из электростанций Донбасса.

Состав угля поступающего на горелки котла, %: $C^r=90$; $H^r=4$; $N^r=0,94$; $O^r=4$; $S^r=1,06$; $A^c=19$; $W^p=0,7$. Объем воздуха теоретически необходимый для сжигания 1 кг угля заданного состава, и удельный выход продуктов сгорания в действительных условиях определены при помощи стандартных расчетных зависимостей, используемых в теории горения топлива [37]: $V^0=7,367 \text{ м}^3/\text{кг}$, $V_r=9,069 \text{ м}^3/\text{кг}$.

В первом приближении для расчета использованы данные ситового анализа пыли от пробы, отобранной после мельницы из аэрационного пылепитателя (АПП) промежуточного бункера пыли (см. таблицу 2.2).

Таблица 2.2. Ситовый анализ пыли, отобранной из (АПП) промежуточного бункера пыли.

№ п/п	Класс крупности, мм	Массовая доля, %
1	0,16-0,125	2,1
2	0,125-0,104	4
3	0,104-0,083	4
4	0,083-0,063	3,9
5	0,063-0,040	10,4
6	0,040-0	75,6
Итого		100,0

Время выгорания для исследования параметрической чувствительности задано на уровне 2,8 с (по опыту работы [37]).

Базовые значения выбраны для исследований параметров согласно [37] и установлены на следующих уровнях: диффузионное число Нуссельта $Nu_D - 2$; коэффициент молекулярной диффузии $D - 4,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; плотность частиц топлива $\rho_k - 958 \text{ кг}/\text{м}^3$; константа скорости реакции горения углерода $k_r - 4,5 \text{ м}/\text{с}$; температура продуктов сгорания в топке $T - 1640 \text{ К}$. Сущность исследования заключается в искусственном задании значений параметров с фиксированными отклонениями от базовых значений и сравнении результатов моделирования при базовых и измененных значениях параметров.

Влияние диффузионного числа Нуссельта

Поскольку минимальное значение этого параметра составляет 2, рассмотрено влияние его повышения на величину остаточного углерода в диапазоне изменения числа Нуссельта от 2 до 2,3. В результате установлено, что увеличение числа Нуссельта сопровождается уменьшением остаточного углерода по практически линейной зависимости (рис. 2.4). При этом изменение диффузионного числа Нуссельта на 15% приводит к изменению остаточного углерода на 11,4%. Полученный результат является достаточно логичным, поскольку увеличение диффузионного числа Нуссельта свидетельствует об интенсификации процессов массообмена на границе поток приведенная пленка,

что в общем случае облегчает условия поступления кислорода в приведенную пленку и улучшает условия выгорания топлива.

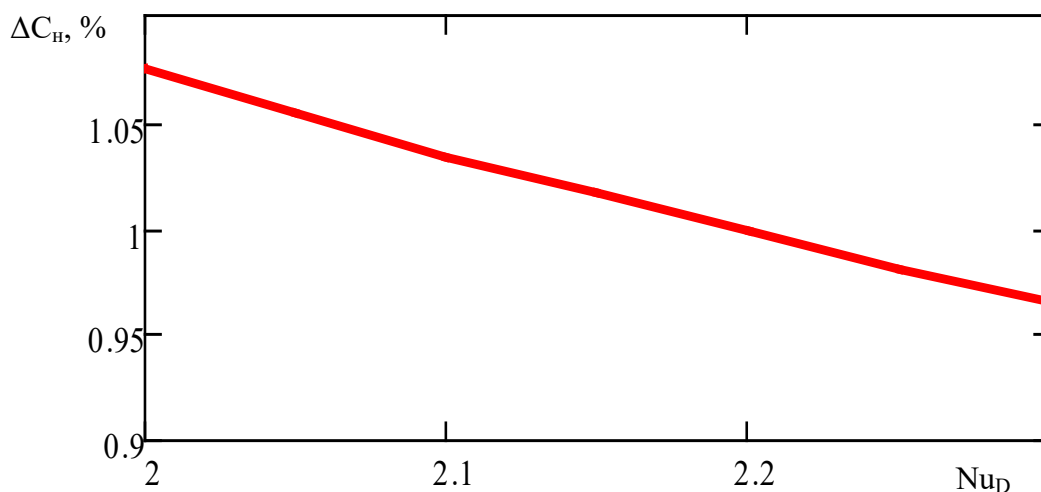


Рис 2.4. Влияние диффузионного числа Нуссельта на общую величину остаточного углерода.

Влияние коэффициента молекулярной диффузии

Установленное базовое значение коэффициента молекулярной диффузии получено исходя из данных работ [37, 94] для типовых условий горения ПУТ в топке энергетического котла. По сравнению с базовой точкой рассмотрены еще четыре уровня D , меньшие и большие базовой точки на 10 и 20%. Результаты представлены на рис. 2.5. Установлено, что при увеличении коэффициента молекулярной диффузии, величина остаточного углерода понижается по зависимости близкой к линейной. В исследованном диапазоне изменение D на величину 50% приводит к изменению остаточного углерода на 38%. Полученный результат соответствует логике протекания процесса, поскольку увеличение коэффициента молекулярной диффузии приводит к снижению диффузионного сопротивления приведенной пленки и имитирует облегчение условий доступа кислорода к поверхности горящего углерода.

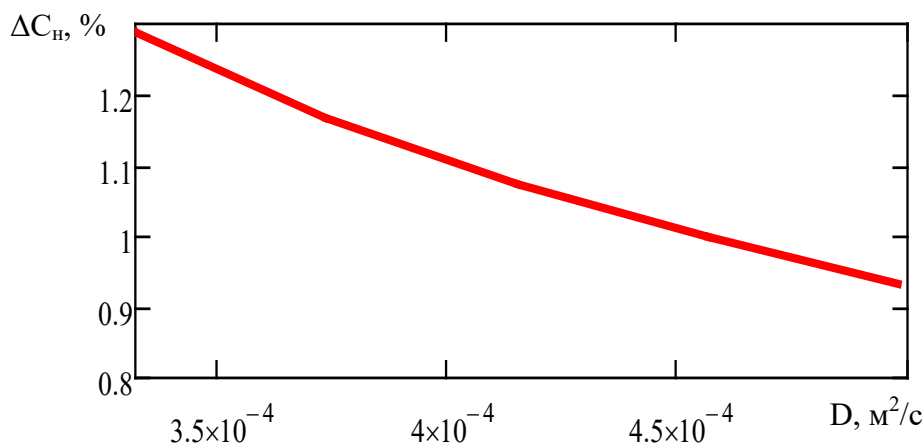


Рис. 2.5. Влияние коэффициента молекулярной диффузии на общую величину остаточного углерода.

Влияние расчетной плотности частиц

Относительно базового уровня плотности коксового остатка рассмотрены еще четыре уровня ρ_k на 10 и 20% больше и меньше базового уровня. Результаты моделирования представлены на рис. 2.6. Как видим, увеличение задаваемого в модель значения ρ_k приводит к увеличению остаточного углерода по зависимости близкой к линейной. В исследованном диапазоне изменение величины ρ_k на 50% приводит к изменению остаточного углерода на 206,5%. Этот расчетный результат является логичным, так как для более плотного материала при том же количестве доставляемого к поверхности частиц кислорода и его расходовании на окисление углерода скорость уменьшения размера частиц должна уменьшаться, а частицы являются более тяжелыми, что и определяют большее расчетное значение остаточного углерода.

Установленная закономерность указывает на важность выбора подхода к заданию плотности выгорающих частиц топлива. Обычно этому вопросу не уделяется достаточно внимания. Хотя вопрос остается открытым. В принципе возможны варианты задания в качестве ρ_k следующих значений:

- истинной плотности угля;
- плотности частиц с учетом выхода летучих (в исходном массиве частиц остаются нелетучий углерод и зола);

– плотности частиц из предположения, что в их объеме частиц остается только нелетучий углерод, а вся зола выплавляется и в виде шарообразных тел, существенно меньших, чем сама частица, и стыкующихся с поверхностью частицы, не препятствуя ее выгоранию [37].

Логично предположить, что на начальном этапе выгорания частицы более справедливым является второй подход, но в течение большей части процесса горения истинная плотность частиц будет ближе всего к значению, определяемому третьим способом. Для моделирования удобно пользоваться единым подходом. В данной работе выбран третий подход. Именно с его помощью было сформулировано базовое использование для исследования значения расчетной плотности частиц для используемого состава угля – 958 кг/м^3 .

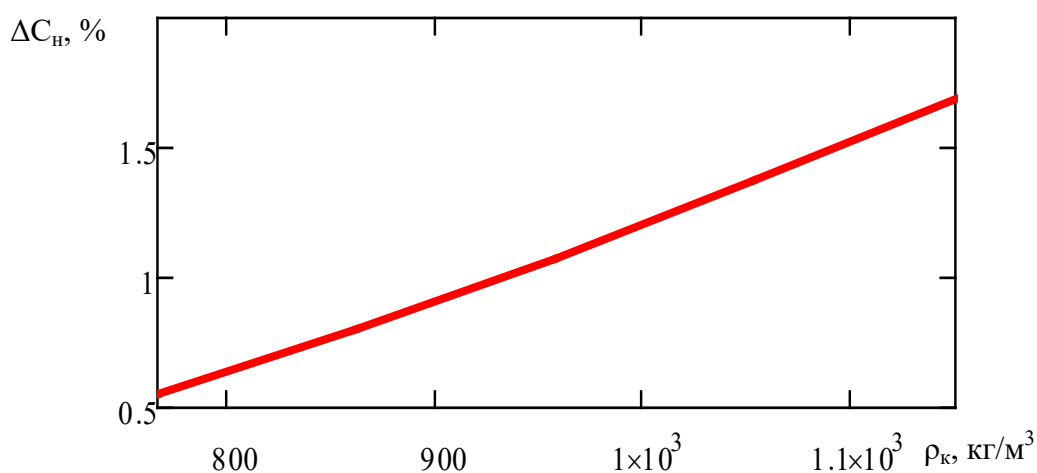


Рис. 2.6. Влияние плотности коксового остатка на общую величину остаточного углерода.

Влияние константы скорости реакции

В качестве базового уровня выбрано значение $4,5 \text{ м/с}$ (по данным работы [37]). Рассмотрены еще четыре уровня k_r на 10 и 20% больше и меньше базового уровня. Результаты представлены на рис. 2.7. Как видим, увеличение задаваемого в модель значения k_r приводит к снижению остаточного углерода по зависимости близкой к линейной. В исследованном диапазоне изменение величины k_r на 50% приводит к изменению остаточного углерода на 87%. Этот результат является

логичным, с ростом константы скорости реакции остаточный углерод должен уменьшаться.

Значение константы скорости реакции углерода определяются при помощи следующего выражения:

$$k_r = k_{r0} * e^{-\frac{E}{RT}}; \quad (2.6)$$

где k_{r0} – предэкспоненциальный множитель;

E – энергия активации реакции, кДж/кмоль.

Исходя из характера зависимости для определения k_r видно, что проведенное исследование (диапазон изменения $k_r \pm 20\%$ от базового уровня) отвечает на вопросы влияния погрешности задания k_r , полученные либо посредством неточного задания предэкспоненциального множителя, либо при крайне незначительных погрешностях задания температуры, поскольку при погрешностях задания температуры уже в несколько десятков градусов неточность определения k_r будет составлять сотни процентов и это будет оказывать очень существенное влияние на результаты определения остаточного углерода.

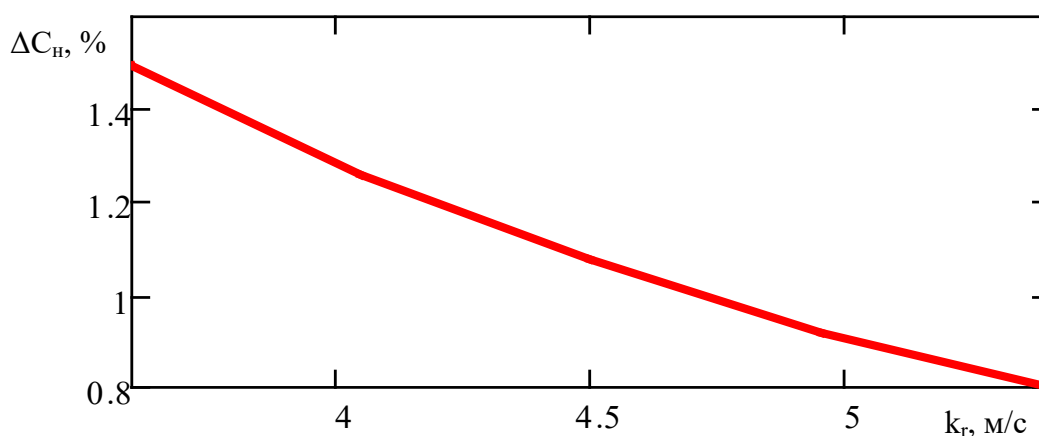


Рис. 2.7. Влияние константы скорости реакции окисления углерода на общую величину остаточного углерода.

Влияние температуры продуктов сгорания

Если подойти формально к исследованию этого вопроса и рассмотреть влияние температуры только лишь как термического параметра состояния в уравнениях типа (1), то будет получен следующий результат – увеличение температуры приводит к увеличению остаточного углерода. С расчетной точки зрения этот результат объясняется уменьшением действительной плотности продуктов сгорания при увеличении их температуры. Однако в целом это противоречит логике процесса – из практики известно, что увеличение температуры приводит к более качественному выгоранию топлива. Аналогичную ситуацию имеем при рассмотрении вопроса о влиянии коэффициента расхода воздуха. Если полагать, что этот параметр определяет только концентрацию кислорода в продуктах сгорания, то при исследовании параметрической чувствительности окажется, что увеличение коэффициента расхода воздуха приводит к существенному понижению остаточного углерода. С расчетной точки зрения это объясняется повышением концентрации кислорода. Однако этот результат также противоречит логике протекания процесса – из практики известно, что данная зависимость носит экстремальный характер и повышение коэффициента расхода воздуха выше некоторого рационального значения приводит к повышению остаточного углерода из-за захлаживания топки.

Поэтому, исследуя параметрическую чувствительность модели по отношению к точности задания температуры необходимо учитывать не только её влияние как термического параметра состояния, но и влияние на значение константы скорости реакции (зависимость (2)). Исследование проведено относительно базового уровня средней температуры продуктов сгорания в топке котла 1800 К. Рассмотрено изменение температуры в пределах 1760 – 1840 К. Результаты представлены на рис. 2.8. Установлено, что с увеличением температуры понижается содержание остаточного углерода. Так, изменение средней температуры в диапазоне 1760 – 1840 К приводит к снижению остаточного углерода на 70%.

Важным также является вопрос, оказывает ли влияние на результаты расчетов задание средней температуры продуктов сгорания в топке вместо реального закона изменения температуры. Для решения этой задачи было проведено при прочих равных условиях два численных эксперимента: со средним значением температуры в топке 1800 К и с учетом изменения этой величины по следующему закону:

$$T = \begin{cases} 1800, & \text{если } \tau < 0.5 \text{ с} \\ 2130 - (2130 - 1470) \cdot (\tau - 0.5) / 2.3, & \text{если } 0,5 \leq \tau \leq 2,8 \end{cases}$$

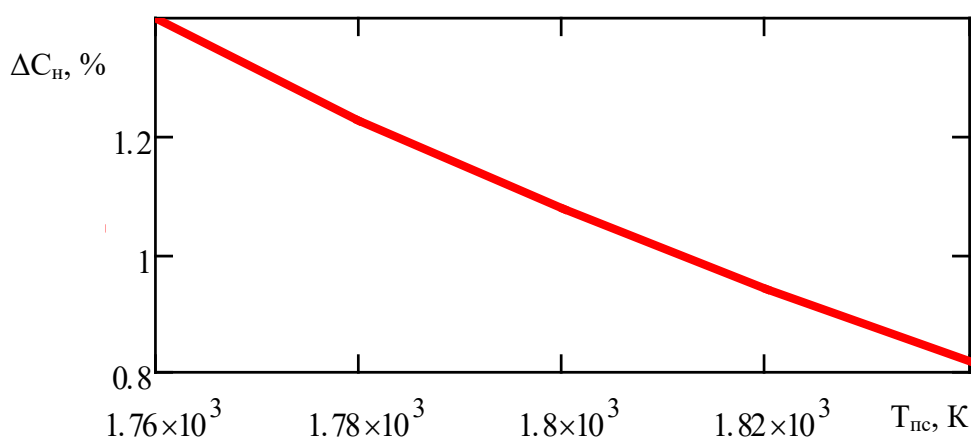


Рис. 2.8. Влияние средней температуры продуктов сгорания на общую величину остаточного углерода.

При составлении этого закона изменения температуры использованы экспериментальные данные о температуре в ядре факела (при встрече факелов горелок установленных на противоположных боковых стенах топки в её средней части) и температуре продуктов сгорания на выходе из топки). Среднеинтегральное значение температуры продуктов сгорания по этому закону также составляет 1800 К.

В первом случае получено значение остаточного углерода 1,075%, а во втором 1,125%. Таким образом, учёт закона изменения температуры в топке позволил уточнить значение остаточного углерода на величину порядка 5%.

Таким образом, в результате исследования параметрической чувствительности математической модели выгорания полифракционного факела установлено, что значительное влияние на результаты моделирования оказывает задание плотности коксового остатка и температуры продуктов сгорания при условии её прямого учёта на значение константы скорости реакции.

Так, в исследованных диапазонах названных величин для плотности коксового остатка остаточный углерод увеличивается на 4%, а для температуры продуктов сгорания уменьшается на 17% на каждый процент роста значений этих величин. Также установлено, что учёт реального закона изменения температуры в топке позволяет уточнить результаты на величину порядка 5%.

Для остальных исследованных параметров (диффузионное число Нуссельта, коэффициент молекулярной диффузии и константа скорости реакции при её прямом задании) установлено, что погрешность определения остаточного углерода составляет порядка 1-2% на каждый процент неточности задания названных параметров.

Полученные результаты важны для адаптации рассматриваемой модели к условиям конкретных энергетических котлов и её дальнейшего эффективного использования поскольку позволяют выделить параметры к заданию которых необходимо относиться наиболее тщательно и создают предпосылки для формирования обоснованной оценки точности получаемых результатов моделирования.

2.3 Методики определения характеристик топлива

Метод определения фракционного состава топлива

Для определения тонкости помола или дисперсности угольной пыли обычно выполняется рассев на рассевочной машине, оснащенной набором сит, пробы пыли (массой 25—50 г) в течение 20 мин [94]. Ситовый анализ угольной пыли проводят на полном комплекте сит с размерами отверстий в ситах от 50 до

1000 мкм при тонком размоле в шаровых барабанных мельницах (ШБМ). Результаты отсева определяют массовыми количествами остатка на сите.

Для проведения анализа применяют:

- грохоты или приспособления, позволяющие устанавливать на катках или подвесках одно или несколько сит с размером отверстий 3 мм и более или 1 мм и более;

- встряхиватели механические стационарные или подвесные и наклонные с открытой поверхностью сит - для отсева мокрым способом;

- делитель рифленый, имеющий не менее 10 желобков на каждой стороне; ширина каждого желобка должна быть не менее чем в 2,5 раза больше максимального размера частицы топлива;

- шкаф сушильный, обеспечивающий температуру нагрева $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$;

- весы технические с относительной погрешностью взвешивания не более 0,1 %;

- емкости для хранения проб, совки, лопаты, щетки, флокулянты и смачиватели;

- сита с проволочными сетками по ГОСТ 3306-88 [95] и листовые с квадратными и круглыми отверстиями ГОСТ 3826-82 [96].

Размер сит должен быть не менее 500'500 мм, а высота бортов не менее 120 мм. После каждых 200 определений проверяют не менее 30 отверстий сит, расположенных по диагонали. Не допускается применять сита, если более 10 % проверенных отверстий имеют отклонения от номинального значения, превышающие 2 %.

Топливо с массовой долей влаги, препятствующей разделению частиц, перед рассевом сушат на воздухе или в сушильном шкафу при температуре не выше $(40 \pm 5) ^\circ\text{C}$, а каменный уголь и антрацит - не выше $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ до видимого отделения частиц топлива друг от друга. Подсушенную пробу топлива перед рассевом охлаждают до комнатной температуры. В каменных углях, подсушенных при температуре $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, не допускается определять показатели спекаемости и коксующести.

При размере кусков в пробе свыше 100 мм всю массу пробы подвергают рассеву. После отсева кусков размером свыше 100 мм оставшуюся пробу допускается сокращать.

Деление и сокращение проб топлива производят порционным методом, а для топлива крупностью 25 мм и менее - рифленным делителем. При порционном методе сокращение производят по периметру основания исходной пробы, насыпанной на ровную площадку, совком шириной не менее 1,5 диаметра максимального размера куска топлива. Порции отбирают последовательно и распределяют их в сокращенную пробу и в отходы. Количество порций в сокращенной пробе должно быть не менее 32.

Помещение, в котором проводят ситовый анализ, должно быть защищено от атмосферных осадков и ветра.

Пробу топлива перед рассевом взвешивают полностью или частями.

Рассев топлива с размером кусков 3 мм и более или 1 мм и более ведут на грохотах и приспособлениях. Ручной рассев применяют также для контроля просеивания механизированным способом.

Рассев начинают на сите с наибольшим размером отверстий.

Высота подачи топлива на сито и разгрузки подрешетного продукта после рассева должна быть не более 400 мм.

Топливо на сито подают частями, не допуская его перегрузки, так, чтобы к концу рассева надрешетный продукт покрывал не более $\frac{3}{4}$ поверхности сетки сита.

При ручном способе рассев ведут в горизонтальной плоскости или с наклоном сита не более 10° при равномерном перемещении материала на сите. Если рассев проводят на подвесных ситах или ситах, расположенных на катках, то время перемещения сита из исходного положения и возвращения в исходное положение должно составлять 1 - 2 с.

Рассев считают законченным, если выход подрешетного продукта в течение 1 мин будет составлять менее 1 % массы топлива, поданного на сито. При

использовании комплекта сит необходимо учитывать подрешетный продукт нижнего сита.

Не допускается продавливать отдельные куски через отверстия сита, но куски размером свыше 100 мм допускается выбирать вручную и отделять во избежание их измельчения.

Рассев топлива крупностью 3 мм и менее или 1 мм и менее ведут на механическом встряхивателе сухим или мокрым способом.

При сухом расसेве пробу топлива помещают на верхнее сито, закрывают его крышкой и включают встряхиватель. Рассев ведут в течение 25 мин. После этого сетку каждого сита снизу очищают щеткой, топливо добавляют в подрешетный продукт данного сита и пробу подвергают контрольному расसेву в течение 1 мин. Снова очищают сетку каждого сита. Надрешетный продукт каждого сита переносят в отдельную емкость.

Надрешетный продукт с каждого сита переносят в отдельные емкости. Подрешетный продукт после нижнего сита осаждают, при этом допускается применять флокулянты. Все продукты рассева сушат.

Полученные при расसेве классы крупности отдельно взвешивают. При необходимости от каждого класса крупности выделяют пробы для определения массовой доли общей серы и фракционного состава, зольности - для углей, удельной теплоты сгорания - для сланцев.

Массовую долю общей влаги в рабочем состоянии топлива определяют, если проба перед рассевом не подвергалась сушке.

В топливе крупностью более 25 мм могут быть определены составляющие компоненты - уголь или сланец, сrostки и минеральные примеси.

Пробы хранят до конца испытания.

Определение удельной теплоты сгорания - по ГОСТ 147-95 [97];

Определение зольности - по ГОСТ 11022-95 [98];

Определение массовой доли общей влаги в рабочем состоянии - по ГОСТ 27314-91 [99];

Определение массовой доли общей серы - по ГОСТ 8606-93 [100];

Метод определения выхода летучих веществ (ГОСТ 6382-80) [101]

Содержание летучих веществ в твёрдом топливе определяют, как потерю массы навески твердого топлива за вычетом влаги при нагревании без доступа воздуха в стандартных условиях. Результаты испытания являются относительными, поэтому для достижения воспроизводимости необходимо соблюдать постоянные скорость нагрева, конечную температуру и продолжительность нагрева. Для уменьшения окисления навески топлива при нагревании доступ кислорода к пробе должен быть ограничен. Это достигается применением тиглей с пришлифованными или притертыми крышками, допускающими свободное удаление летучих веществ, но препятствующими проникновению кислорода. Навеску пробы нагревают без доступа воздуха при температуре 900 °С в течение 7 мин. Выход летучих веществ в процентах рассчитывают по потере массы навески за вычетом потери массы, обусловленной влажностью пробы.

Метод определения зольности твердого топлива

Отбор и разделка пробы твёрдого топлива (угольной пыли) производится с целью определения в ней содержания зольности на рабочую массу, величина которой характеризует негорючих веществ в твёрдом топливе. Методика определения зольности твердого топлива на рабочую массу определялась согласно ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-81) [98].

Отбор пробы угольной пыли производится из пробоотборника каждого циклона пылесистемы энергоблока специальным пробоотборным устройством в количестве 200 – 300 грамм.

Проба угольной пыли подвергают разделке, которая включает в себя сокращение пробы до веса 80 – 100 грамм с помощью шахматного порционера и рассеивания сокращенной пробы через сито 200 мкн. В случае необходимости пробы измельчаются в ступке до полного прохождения через сито.

Ход определения. Для определения содержания рабочей зольности из пробы берется навеска 1 грамм на аналитических весах с точностью до 0,001 г в

специальную фарфоровую лодочку. Проба перед взятием навески тщательно перемешивается шпателем, и навеска набирается небольшими порциями из разных мест. Фарфоровая лодочка с пробой взвешиваются повторно с фиксацией показаний в журнале. Лодочка с навеской помещается в муфельную печь, предварительно нагретую до 200 0С. Затем температуру в муфельной печи повышают до 850 ± 10 0С, после чего выдерживают лодочку с навеской при этой температуре в течение 1 часа. После прокаливания лодочки с навеской в течении часа в муфельной печи, лодочку с навеской охлаждают и повторно взвешивают. Убыль в весе в граммах отнесенная к взятой навеске выраженная в процентах дает величину содержания рабочей зольности в твёрдом топливе.

Метод определения влаги твердого топлива (ГОСТ 27314-91 (ИСО 589-81) [99]

Настоящий стандарт распространяется на каменные и бурые угли, лигниты, антрациты и горючие сланцы (далее - топливо) и устанавливает методы определения в них внешней влаги, влаги воздушно-сухого топлива и аналитической пробы, а также методы определения общей влаги.

Сущность метода заключается в высушивании пробы при комнатной температуре или в сушильном шкафу с температурой не более 40°С для бурых углей и не более 50°С для каменных углей и горючих сланцев и вычислении массовой доли влаги по потере в массе.

Максимальный размер зерна пробы для определения внешней влаги не должен превышать 20 мм. Масса пробы в килограммах должна быть не менее 0,1 максимального размера куска в миллиметрах, но не менее 0,5 кг.

Ход определения. Пробу разравнивают на взвешенном противне так, чтобы на 1 дм² поверхности приходилось не более 100 г пробы. Противень с пробой взвешивают с точностью до 0,05 % массы навески и ставят для свободной сушки в помещении с хорошей вентиляцией или в сушильный шкаф.

Сущность метода заключается в высушивании навески аналитической пробы топлива (максимальный размер зерен не более 2 мм) в сушильном шкафу при температуре 105-110°C и вычислении массовой доли влаги по потере в массе.

Из аналитической пробы топлива во взвешенную бюксу отбирают около 1 г топлива. Бюксу с навеской топлива помещают в сушильный шкаф, предварительно нагретый до температуры 105-110°C и при этой температуре сушат не менее 30 мин. После окончания сушки бюксы вынимают из сушильного шкафа, закрывают крышками и охлаждают 2-3 мин на металлической подставке, затем в эксикаторе до комнатной температуры, после чего взвешивают. Проводят контрольные сушки в течение 30 мин каждая до тех пор, пока расхождение между двумя взвешиваниями будет не более 0,001 г. За результат принимают самую низкую массу.

Массовую долю внешней влаги (W_{ex}), влаги воздушно-сухого топлива (W_h) и аналитической пробы (W^a) в процентах вычисляют по формуле

$$W = \frac{m_1}{m_2} \cdot 100,$$

где m_1 - потеря массы при сушке навески, г;

m - масса навески пробы топлива, г.

Результаты вычисляют с точностью до 0,1 %.

Выводы по разделу 2

Усовершенствована математическая модель выгорания полифракционного пылеугольного топлива в факеле, что позволяет учесть одновременно особенности выгорания каждой из фракций угольной пыли, определяемые ее средним размером и зольностью. Предложенная модель базируется на системе обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих изменение размера частиц каждой из выделенных для рассмотрения фракций.

Доказано существенное влияние количества выделенных для рассмотрения фракций на величину установленного при помощи математической модели механического недожога.

Обосновано влияние учета времени задержки воспламенения частиц каждой из фракций на уточнение результатов определения величины механического недожога.

В результате исследования параметрической чувствительности математической модели выгорания полифракционного факела установлено, что значительное влияние на результаты моделирования оказывает задание плотности коксового остатка и температуры продуктов сгорания при условии её прямого учёта на значение константы скорости реакции. В исследованных диапазонах названных величин для плотности коксового остатка остаточный углерод увеличивается на 4%, а для температуры продуктов сгорания уменьшается на 17% на каждый процент роста значений этих величин.

Для остальных исследованных параметров (диффузионное число Нуссельта, коэффициент молекулярной диффузии и константа скорости реакции при её прямом задании) установлено, что погрешность определения остаточного углерода составляет порядка 1-2% на каждый процент неточности задания названных параметров.

Полученные результаты важны для адаптации рассматриваемой модели к условиям конкретных энергетических котлов и её дальнейшего эффективного использования, поскольку позволяют выделить параметры к заданию которых необходимо относиться наиболее тщательно и создают предпосылки для формирования обоснованной оценки точности получаемых результатов моделирования.

Описаны использованные в работе методики, предназначенные для определения такие характеристики топлива как зольность, влажность, выход летучих.

ГЛАВА 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВА В КОНКРЕТНЫХ УСЛОВИЯХ

3.1 Постановка задачи определения времени задержки воспламенения в конкретных условиях

Наиболее длительным этапом выгорания угольной частицы является именно горение коксового остатка. Остальные этапы: прогрев частицы, выделение летучих веществ и их горение, – протекают значительно быстрее, при этом они, как правило, накладываются друг на друга [37, 107, 125]. В то же время следует понимать, что время выгорания коксовой частицы оказывается меньше среднего времени пребывания частицы в топке на величину времени задержки воспламенения $\Delta\tau_3$.

Для использования математической модели, представленной во втором разделе диссертации, необходимо задавать время выгорания коксового остатка частиц топлива, которое определяется как разность между средним временем пребывания частиц в топке и временем задержки воспламенения.

С практической точки зрения, известно, что при прочих равных условиях величина механического недожога может быть снижена за счет уменьшения времени задержки воспламенения $\Delta\tau_3$.

Для определения реального времени выгорания коксового остатка топливных частиц в каждом конкретном случае необходимо иметь свое значение времени задержки воспламенения.

Даже для одного и того же энергетического парогенератора эта величина может изменяться после его реконструкции. По своей сути реализация конкретных мероприятий по снижению механического недожога сводится к сокращению времени задержки воспламенения. Например, одним из основных направлений работы по снижению уровня механического недожога является использование усовершенствованных конструкций пылеугольных горелок. В этом

случае положительный результат, как правило, достигается за счет достижения более рациональной аэродинамической картины движения среды в топочном пространстве, приводящей к улучшению контакта топлива с окислителем, рециркуляции части высокотемпературных продуктов сгорания и, как следствие, ускоренному прогреву частиц топлива и их более быстрому воспламенению. Однако данные, позволяющие напрямую оценить изменение времени задержки воспламенения частиц топлива в каждом конкретном случае, отсутствуют.

В целях адаптации математической модели выгорания полифракционного факела необходима разработка способа определения времени задержки воспламенения топлива в конкретных условиях. Кроме того сами по себе данные об изменении времени задержки воспламенения является ценной информацией, характеризующей эффективность усовершенствования технологических или конструктивных параметров сжигания ПУТ.

3.2 Методика определения времени задержки воспламенения

Прогрев частиц достигается за счет контакта вновь поступающего топлива с горячими продуктами сгорания либо за счет предварительной тепловой обработки.

В условиях электростанции потеря тепла с механическим недожогом (q_4) [4, 14] определяется как:

$$q_4 = a_{\text{ун}} \frac{c_{\text{г}}^{\text{ун}}}{100 - c_{\text{г}}^{\text{ун}}} \cdot \frac{7800 \cdot A^{\text{г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}; \quad (3.1)$$

где: $a_{\text{ун}}$ – доля золы топлива в уносе, равная 0,85;

$c_{\text{г}}^{\text{ун}}$ – содержание горючих компонентов в уносе, %;

$A^{\text{г}}$ – зольность топлива, отнесенная к рабочей массе, %;

$Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – низшая теплота сгорания твердого топлива, Ккал/кг.

При получении практических результатов важно на их основе адаптировать математическую модель выгорания полифракционного факела для учета новых

особенностей (технологических или конструктивных) технологии сжигания твердого топлива.

При помощи этой модели для реально используемого уровня средней температуры газов в топке моделируется процесс выгорания топлива для промежутка времени от 0 до $\tau_{\text{ср}}$. В первом приближении величину $\tau_{\text{ср}}$ можно оценить при помощи модели идеального вытеснения [37]:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{V_{\text{т}}}{BV_{\text{пс}}} \cdot \frac{273}{T_{\text{ф}}}; \quad (3.2)$$

где $V_{\text{т}}$ – внутренний объем топки, м³;

B – расход пылеугольного топлива (ПУТ), кг/с;

$V_{\text{пс}}$ – удельный выход продуктов сгорания, нм³/кг;

$T_{\text{ф}}$ – средняя температура факела, К.

Такое приближение является достаточно грубым, однако может быть использовано, поскольку для исследования важно просто зафиксировать интервал моделирования более продолжительный, чем реальное время горения коксового остатка.

При помощи данной модели для набора исходных данных, соответствующих параметрам проведения испытания, можно получить зависимость доли несгоревшего углерода от времени. Пересчет доли несгоревшего углерода на расчетную величину механического недожога осуществляется по формуле

$$q_4 = G_c \cdot \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{7830}; \quad (3.3)$$

где G_c – оставшаяся после пребывания топлива в топке доля несгоревшего углерода;

7830 – теплота сгорания углерода, Ккал/кг.

В результате получаем кривую, описывающую изменение величины механического недожога во времени (рис. 3.1). Далее от значения q_4 , полученного в результате анализа золы уноса, проводится горизонтальная линия до пересечения с модельной кривой (рис. 3.1). Из точки их пересечения на ось

времени опускается перпендикуляр. Его пересечение с осью абсцисс показывает реальное время, в течение которого протекало горение коксового остатка.

Если полученное время горения коксового остатка оказывается выше величины, определенной по формуле (3.2), то это указывает на неправильно заданный температурный уровень протекания процесса.

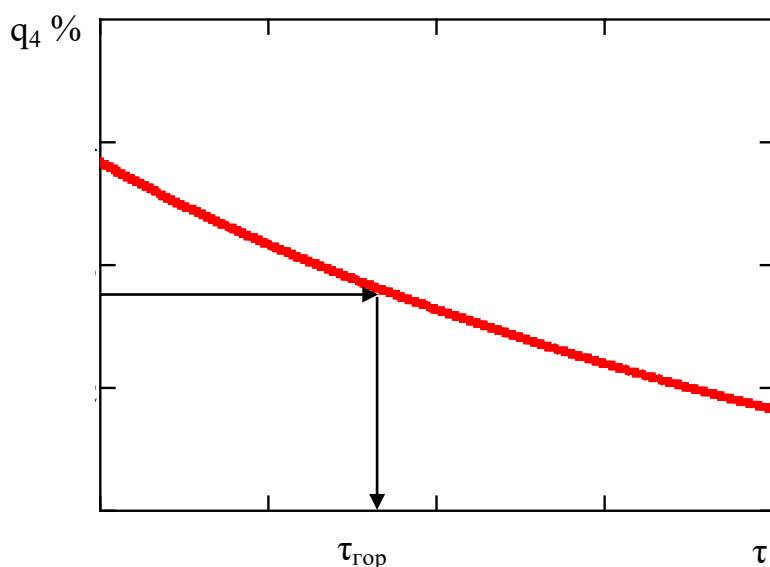


Рис. 3.1. Изменение механического недожога во времени.

Реальное время горения коксового остатка меньше на величину задержки воспламенения $\Delta\tau_3$:

$$\tau_{ГОР} = \tau_{ср} - \Delta\tau_3; \quad (3.4)$$

Для некоторых марок углей и котельных агрегатов при малых значениях q_4 и определении $\tau_{ср}$ по модели идеального вытеснения может получиться, что $\tau_{ср} < \tau_{гор}$. В этом случае необходимо искусственно задать значение $\tau_{ср}$, на 10–20 % большее, чем $\tau_{гор}$.

На основании работы со значениями q_4 до реконструкции и после реконструкции определяем время горения коксового остатка в обоих случаях. При одинаковом полном времени горения τ это приводит к тому, что реальное время выгорания коксового остатка оказывается выше для случая успешно проведенной реконструкции.

Таким образом, в результате реконструкции (в нашем случае замены или реконструкции горелок) должен быть достигнут результат, при котором сокращается время задержки воспламенения и повышается время выгорания кокосового остатка:

$$\Delta\tau_3^{\text{посл.р}} < \Delta\tau_3^{\text{до.р}}; \tau_{\text{гор}}^{\text{посл.р}} > \tau_{\text{гор}}^{\text{до.р}}; \quad (3.5)$$

3.3 Определение времени задержки воспламенения до и после реконструкции горелок

Использование данного способа адаптации модели при реконструкции пылеугольных горелок парогенератора проведено для условий Старобешевской ТЭС Донбасса, на трех энергетических блоках которой проводилась замена горелок.

Реконструкция основных горелок котла ТП-100 позволила в конкретных условиях Старобешевской ТЭС выполнить требования отраслевого стандарта (ОСТ) на горелочные устройства «Горелки вихревые пылеугольные, пылегазовые и компоновка их с топками. Методы расчета и проектирования. ОСТ 108.030.26–78» [53]. Геометрический параметр крутки первичного воздуха составляет 3,94 (рекомендуемый диапазон 3,5–4,0) (до реконструкции – 5,07), вторичного воздуха – 4,28 (рекомендуемый диапазон 4,0 – 4,5) (до реконструкции – 2,78). Втулочное отношение (отношение диаметра центральной трубы к диаметру амбразуры) составляет 0,355 (рекомендуемый диапазон $0,35 < m < 5,0$) (до реконструкции – 0,295). Расчетное соотношение скоростей w_2/w_1 составляет 1,38 (рекомендуемый диапазон 1,3–1,4) (до реконструкции – 2,08) (Приложение Д).

В результате испытаний было установлено, что температура ядра факела повысилась на 40–60 °С, по сравнению с другими котлами, и достигает 1930–1950 К, что свидетельствует об интенсификации рециркуляции топочных газов к устью горелок. Повысилось статическое давление вторичного воздуха перед горелками до 70–90 кГс/м² (на других котлах 20–30 кГс/м²) за счет повышения их

аэродинамического сопротивления, благодаря чему имеется подпор горячего воздуха на входе в мельницы. Появилась возможность работы систем пылеприготовления с минимальным разрежением перед мельницами 20–40 кГс/м², что позволяет повысить сушильную производительность и снизить присосы холодного воздуха до 33,0 % (до реконструкции – 57,6 %).

Уровень механического недожога был установлен в результате анализа золы уноса до и после реконструкции (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Значения механического недожога для разных блоков ТЭС до и после реконструкции горелок.

№ блока	Механический недожог до замены горелок, %	Механический недожог после замены горелок, %
9	8,4	6,3
11	8,0	6,6
12	9,5	6,4

Для оценки изменения реального времени горения коксового остатка частиц ПУТ до и после реконструкции по предложенному способу было проведено моделирование выгорания полифракционного факела для следующих исходных данных: средняя температура в топочном пространстве 1640 К; коэффициент расхода воздуха 1,19; состав угля, поступающего на горелки котла, %: $C^r = 90$; $H^r = 4$; $N^r = 0,94$; $O^r = 4$; $S^r = 1,06$; $A^c = 19$; $W^p = 0,7$. Фракционный состав топлива задан следующим образом: 0,04–0 мм – 75,6 %; 0,063–0,04 мм – 10,4 %; 0,083–0,063 мм – 3,9 %; 0,104–0,083 мм – 4 %; 0,125–0,104 мм – 4 %; 0,16–0,125 мм – 2,1 %.

Пример графического определения реального времени горения коксового остатка для блока № 9 по предложенной схеме (рис. 3.1) представлен на рис. 3.2. Количественные результаты определения $\tau_{гор}$ и $\Delta\tau_3$ для трех энергоблоков представлены в табл. 3.2.

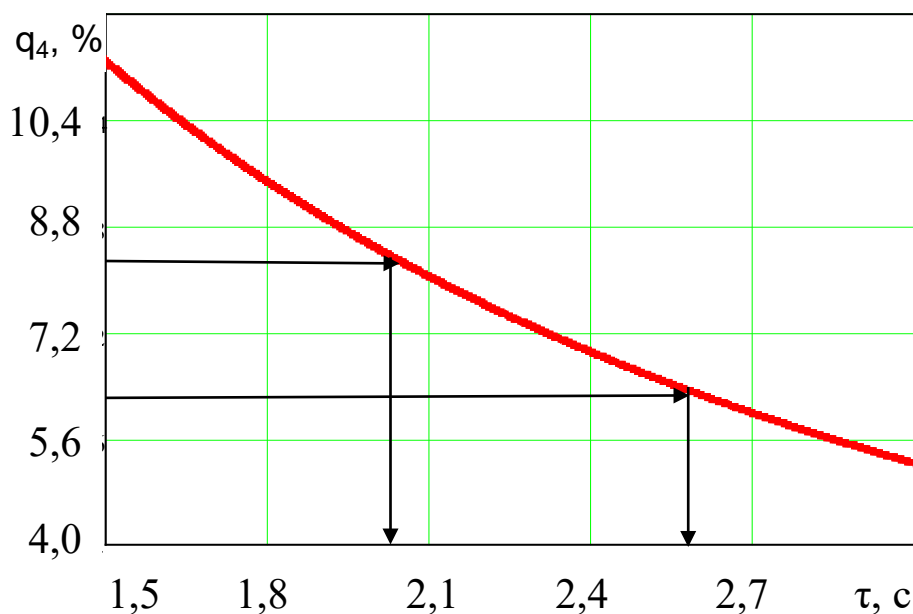


Рис. 3.2. Графическое определение реального времени горения коксового остатка для блока № 9 по предложенной схеме.

Таблица 3.2. Установленные значение времени горения частиц и времени задержки воспламенения до и после реконструкции.

№ блока	$\tau_{\text{гор}}^{\text{до.р}}, \text{с}$	$\tau_{\text{гор}}^{\text{после.р}}, \text{с}$	$\Delta\tau_3^{\text{до.р}}, \text{с}$	$\Delta\tau_3^{\text{после.р}}, \text{с}$	$\Delta\tau_3^{\text{до.р}} - \Delta\tau_3^{\text{после.р}}, \text{с}$
9	2,018	2,588	0,982	0,412	0,570
11	2,100	2,490	0,900	0,510	0,390
12	1,796	2,556	1,204	0,444	0,760

Выводы по разделу 3

Предложена методика определения времени задержки воспламенения основанная на сопоставлении и совместной обработке результатов выгорания топлива во времени, полученных при помощи усовершенствованной математической модели, и практических данных о величине механического недожога.

Установлено, что до реконструкции горелок парогенераторов ТП-109 Старобешевской ТЭС время задержки воспламенения составляло от 0,9 до 1,2 с, а после замены горелок на лопаточно-улиточные с усовершенствованными параметрами крутки оно составляет 0,41–0,51 с. Это позволило увеличить время горения пыли на 0,39–0,76 с, что и объясняет экспериментально зафиксированное сокращение механического недожога на 1,4–3,1 %.

Предложенный способ определения времени задержки воспламенения и результаты, полученные с его помощью, позволяют проводить адаптацию упрощенной математической модели выгорания пылеугольного топлива к конкретным условиям, например, в случае приобретения нового оборудования или реконструкции старого.

ГЛАВА 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ГЛУБИНУ ВЫЖИГАНИЯ

4.1 Сущность реконструкции пылесистемы, позволяющей обеспечить предварительный тепловой контакт ПУТ и горячего воздуха

Механический недожог при сжигании пылеугольного топлива (ПУТ) в топках энергетических котлов связан с тем, что крупные частицы не успевают полностью сгореть за время пребывания в топочном пространстве [37, 109-111]. Также известно, что воспламенение частиц происходит не моментально после попадания в топку, а по истечении некоторого времени задержки воспламенения. Таким образом, усилия по снижению механического недожога прикладываются по двум направлениям [94, 99, 101, 109, 125]:

- управление параметрами измельчения и снижение доли крупных частиц;
- сокращение времени задержки воспламенения за счет совершенствования параметров горелок либо за счет предварительной тепловой обработки пыли [103-104, 113, 124].

Обычно на угольных тепловых электростанциях пылепроводы высокой концентрации (ППВК) непосредственно подводятся к основным горелкам и врезаются в вертикальные воздухопроводы горячего воздуха. Такая схема подключения имеет такие недостатки, как пульсация давления пылевоздушной смеси в пылепроводах; недостаточный прогрев угольной пыли перед поступлением в топку по условиям более раннего воспламенения; неравномерное распределение пыли по сечению канала первичного воздуха на выходе из горелки.

Перечисленные недостатки данной системы ППВК приводят к увеличению содержания горючих веществ в уносе, а также к необходимости подсветки пылеугольного факела газом или мазутом.

Для решения этой проблемы в условиях Старобешевской ТЭС в 2010 г для обеспечения более раннего контакта пыли с горячим первичным воздухом, чем по традиционной схеме, была опробована схема ее подачи за счет врезки ППВК в канал первичного воздуха в районе бункера пыли. После переврезки (ППВК) в трубопроводы первичного воздуха к горелкам котла за счет более раннего смешения пыли в трубопроводе первичного воздуха, были достигнуты следующие результаты:

- значительно уменьшилась пульсация давления пылевоздушной смеси в пылепроводах из-за обеспечения условий более устойчивого горения;
- повысилась равномерность распределения угольной пыли между горелками перед поступлением в топку котла;
- более равномерным стало распределение угольной пыли по сечению канала первичного воздуха на выходе из каждой горелки.

Реализация рассматриваемого мероприятия в процессе эксплуатации энергоблока позволила полностью исключить подсветку пылеугольного факела газом при нагрузке 130 МВт и достичь снижение механического недожога на величину порядка 1%.

Однако до сих пор не было проведено детальное количественное исследование физико-химических трансформаций, которые ПУТ претерпевает в процессе предварительного контакта с горячим первичным воздухом. Результаты такого исследования должны дать понимание основных причин, позволивших существенно сократить механический недожог и процессов и ответить на вопрос, полностью ли исчерпаны возможно рассматриваемого мероприятия.

В данном разделе диссертационной работы проводится исследование трансформаций ПУТ в процессе контакта с горячим воздухом до входа в горелочное устройство и объяснение физической сущности результатов по снижению механического недожога.

Исследование проведено на котлоагрегате ТП-100 энергоблока №6 Старобешевской ТЭС. Исследуемая схема подачи пыли (схема переврезки) к горелкам с аэрационными пылепитателями (АПП) и базовая проектная схема

пылеподачи показаны на рис. 4.1. В результате реконструкции обеспечено прохождение смесью пыли с горячим первичным воздухом большего расстояния и, следовательно, увеличено время воздействия на поток пыли высоких температур до попадания в горелку.

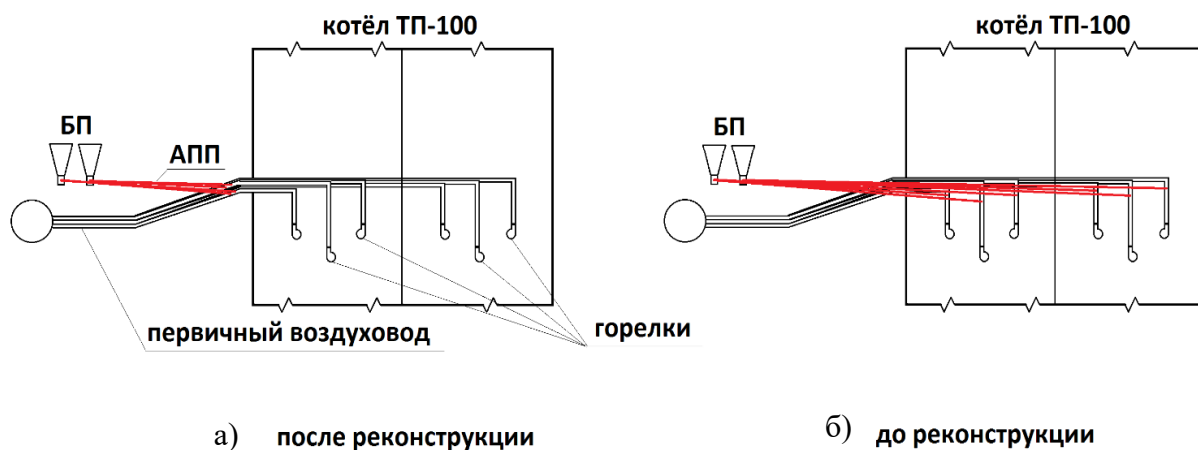


Рис. 4.1. Схема трассировки аэроционного пылепитателя к воздухопроводам первичного воздуха до реконструкции (б) и после реконструкции (а).

4.2 Получение экспериментальных данных

Для более глубокого анализа улучшения процесса горения в топке после изменения схемы переврезки ППВК были произведены контрольные отборы проб угольной пыли в различных местах. Основной отбор пробы был взят из-под бункера готовой пыли, где горячий воздух не взаимодействует с угольной пылью и не оказывает своего влияния. Четыре пробы угольной пыли отбирались непосредственно перед горелками из воздухопровода первичного воздуха, в котором первоначально угольная пыль смешалась с горячим воздухом подающим на первичную улитку основной горелки котла. Для отборов пыли выбраны горелки, лежащие на различных расстояниях от места врезки: минимально удаленная горелка №5, максимально удаленная горелка №9 и две горелки №1 и №7, находящиеся на примерно одинаковом среднем расстоянии от места врезки. Отбор пробы угольной пыли выполнялся в соответствии с «Инструкция по отбору пробы угольной пыли на тепломеханическом оборудовании»

Для отобранных проб определялось количество общей влаги и содержание летучих.

Определение общего содержания влаги в отобранных пробах проводилось по стандартной схеме [105], предполагающей использование сушильного электрического шкафа с терморегулятором, обеспечивающим устойчивую температуру нагрева (160 ± 5) °С, с естественной вентиляцией воздуха. После окончания сушки в сушильном шкафу противень с пробой вынимался для свободной сушки при комнатной температуре, взвешивался каждый час до тех пор, пока результаты двух последних взвешиваний будут отличаться не более чем на 0,01% исходной массы пробы.

Массовую долю общей влаги определялась по формуле:

$$W = \frac{m_1}{m} \cdot 100, \% \quad (4.1)$$

где m_1 - потеря массы при сушке навески топлива, г;

m - масса навески пробы топлива, г.

Результаты определялись с точностью до 0,01%.

Для определения выхода летучих веществ использована стандартная методика [106]. Масса пробы навески составляла $(1 \pm 0,01)$ г. Она в течение 7 мин нагревалась без доступа воздуха при температуре 900 °С. Выход летучих веществ определен по потере массы навески за вычетом потери массы, обусловленной влажностью пробы.

$$V^л = \frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - W; \quad (4.2)$$

где m_1 - масса пустого тигля с крышкой, г;

m_2 - масса тигля с крышкой и пробой до испытания, г;

m_3 - масса тигля с крышкой и нелетучим остатком после испытания, г.

Результаты определялись с точностью до 0,01%.

В качестве топлива использовался антрацит с теплотой сгорания 23500 кДж/кг, зольностью 21%, влажностью после мельницы 0,9% с содержанием летучих (в бункере) 8,9%. При приведении эксперимента котел ТП-100 работал с номинальной тепловой нагрузкой и расход первичного воздуха на каждую

горелку 7878 м³/ч (н.ф.у.). Исходя из этого скорость воздуха в соответствующих трубопроводах к горелкам (при их внутреннем диаметре 350 мм) составляет 22,75 м/с. Температура горячего первичного воздуха составляла 400°С, температура пыли в бункере 80 °С, температура аэропылевзвеси на входе в каждую выбранную для изучения горелку находилась в пределах 230-240°С. Согласно предварительным расчетным оценкам прогрев пыли и выход на конечную температуру завершается задолго до достижения первой по ходу 5-ой горелки (0,528 с). Условно для горелок, время транспорта аэропылевзвеси до которых превышает 0,528 с, можно принять температуру процесса равной 240 °С.

Время контакта пыли с горячим воздухом определено, как отношение расстояния от врезки ППВК в воздуховод до горелок к скорости движения среды.

Значения параметров, характеризующих каждую точку отбора представлены в таблице 4.1, а установленные в лабораторных условиях характеристик обобранных проб ПУТ представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.1. Параметры точек отбора проб.

Параметры точек отбора	Номера горелок			
	5	1	7	9
Расстояние от врезки ПВК до горелки, м	12	14,8	17,1	20,5
Время контакта пыли с горячим воздухом, с	0,528	0,651	0,752	0,901

Таблица 4.2. Характеристики проб отобранного ПУТ.

		Результаты параллельных опытов					средне е
		I	II	III	IV	V	
Содержание летучих в пробах у соответствующих горелок, %	Гор. №5	8,3	8,4	8,5	8,5	8,3	8,4
	Гор. №1	7.3	7.2	7.2	7.5	7.3	7,3
	Гор. №7	7.2	7.1	7.3	7.2	7.2	7,2
	Гор. №9	6.5	6.6	6.9	7.0	6.5	6,7
Остаточная влага в пробах у соответствующих горелок, %	Гор. №5	0.24	0.24	0.25	0.23	0.24	0.24
	Гор. №1	0.24	0.24	0.21	0.23	0.23	0.23
	Гор. №7	0.16	0.16	0.14	0.15	0.14	0.15
	Гор. №9	0.12	0.12	0.14	0.14	0.13	0.13

Результаты определения относительного количества выделившихся летучих и влаги представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Относительное количество выделившихся летучих и влаги.

Характеристики ПУТ				
	5	1	7	9
Содержание летучих в пробе перед горелкой, %	8,4	7,3	7,2	6,7
Относительное количество выделившихся летучих, %	5,6	18,0	19,1	24,7
Содержание влаги в пробе перед горелкой, %	0,24	0,23	0,15	0,13
Относительное количество выделившейся влаги, %	4	8	40	48

4.3 Теоретическое описание полученных результатов

Из анализа результатов экспериментов можно заключить, что и удаление влаги и выделение летучих имеют общую закономерность, а именно, чем больше время контакта исходного ПУТ из бункера пыли с горячим воздухом, тем в большем количестве выделяются как влага, так и летучие.

В наиболее простом виде выход летучих веществ по однокомпонентной схеме расчета описывается следующим выражением [37]:

$$C = 1 - \exp(-k \cdot \tau); \quad (4.3)$$

где C – относительное количество выделившихся летучих веществ к моменту времени τ ;

k – константа скорости процесса выделения летучих, с^{-1} .

Величина k зависит от температуры процесса по следующей экспоненциальной зависимости:

$$k = k_0 \cdot \exp(-E/RT); \quad (4.4)$$

где k_0 – базовая константа скорости процесса выделения летучих веществ, с^{-1} ;

E – энергия активации процесса выделения летучих веществ, Дж/моль;

R – газовая постоянная, Дж/(моль·К);

T – температура, при которой протекает процесс, К.

Для антрацитов и тощих углей в работе [37] для расчетов выхода летучих по однокомпонентной схеме рекомендуется использовать следующие значения: $E=60,7$ МДж/кмоль, $k_0=212$ с⁻¹.

В случае изменяющейся температуры возможно использование ее среднеинтегрального значения. Для четырех выбранных для изучения горелок из выражения (4.4) были определены значения константы скорости процесса выделения летучих и получены значения, приведенные в Таблице 4.4.

Таблица 4.4. Значения констант скорости выделения летучих, установленные в результате обработки экспериментальных данных.

Наименование	№ горелки			
	5	1	7	9
Значения k	0.11	0.305	0.282	0.315

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что прогрев пыли протекает достаточно быстро и завершается до 0,528 с, поскольку только константа скорости процесса для 5-ой горелки существенно отличается от остальных, что можно объяснить тем, что в этом случае среднеинтегральная температура процесса получилась значительно ниже, чем для остальных.

Для дальнейшей совместной обработки выбраны экспериментальные данные, соответствующие отбору проб у горелок №1, №7 и №9. Для обоснования возможности совместной обработки этих данных (Таблица 4.5) выполнена проверка однородности соответствующих дисперсий.

Таблица 4.5. Исходные данные о содержании летучих перед горелкой, взятые для обработки.

Номера горелок	Содержание летучих в пробе перед горелкой	
	Выборочное среднее	Дисперсия
1	7,3	$1,894 \cdot 10^{-4}$
7	7,2	$6,312 \cdot 10^{-5}$
9	6,7	$6,944 \cdot 10^{-4}$

Проверка однородности трех дисперсий выполнена при помощи критерия Бартлетта. Расчетное значение критерия определено как:

$$G_p = \frac{S_9^2}{S_1^2 + S_7^2 + S_9^2} = \frac{6.944 \cdot 10^{-4}}{1.894 \cdot 10^{-4} + 6.312 \cdot 10^{-5} + 6.944 \cdot 10^{-4}} = 0.733 \quad . (4.5)$$

Нижний индекс в обозначении соответствующих дисперсий указывает на номер горелки, у которой отбиралась проба ПУТ.

Табличное значение критерия Бартлетта для рассматриваемой задачи составляет $G_{\text{табл}} = 0,7457$.

Поскольку $G_p < G_{\text{табл}}$ дисперсии можно считать однородными и для дальнейшей работы определяется средневзвешенная дисперсия. Поскольку у всех трех дисперсий числе степеней свободы одинаковы, средневзвешенная дисперсия определяется как:

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{S_1^2 + S_7^2 + S_9^2}{3} = \frac{1.894 \cdot 10^{-4} + 6.312 \cdot 10^{-5} + 6.944 \cdot 10^{-4}}{3} = 3,156 \cdot 10^{-4} \quad . (4.6)$$

При помощи метода наименьших квадратов для трех экспериментальных точек (горелки №1, №7 и №9) определено значения константы скорости процесса возгонки летучих веществ для аппроксимирующего выражения типа (1). Полученное значение k составляет 0,302. На рис. 4.2 представлено сопоставление аппроксимирующей кривой $C = 1 - \exp(-0.302 \cdot \tau)$ и точек экспериментальных данных.

Проверка адекватности полученного уравнения регрессии выполнена стандартным образом:

- 1. Определяется дисперсия адекватности:

$$S_{\text{ад}}^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / f_{\text{ад}} \quad ; \quad (4.7)$$

где n -количество комбинаций аргументов, которым с помощью расчетной модели сопоставлены значения искомой величины;

y_i – экспериментальное значение искомой величины, соответствующее i -ому значению аргумента

\hat{y}_i - значение искомой величины, соответствующее i -ому значению аргумента, полученное с помощью уравнения регрессии;

$f_{ад} = n-l$ -количество степеней свободы;

1. Количество коэффициентов уравнения регрессии (для уравнения полученного в этом разделе $l=1$);

2. Определяется дисперсия воспроизводимости. Применительно к рассматриваемой задаче она численно равна средневзвешенной дисперсии, соответствующей результатам обработки экспериментальных данных

3. Вычисляется расчетное значение критерия Фишера $F = S_{ад}^2 / S_{в}^2$;

4. Выбирается соответствующее табличное значение критерия Фишера для доверительной вероятности 0,955, $F_{\alpha}(f_{ад}, f_{в})$ где $f_{в}$ - число степеней свободы для дисперсии воспроизводимости;

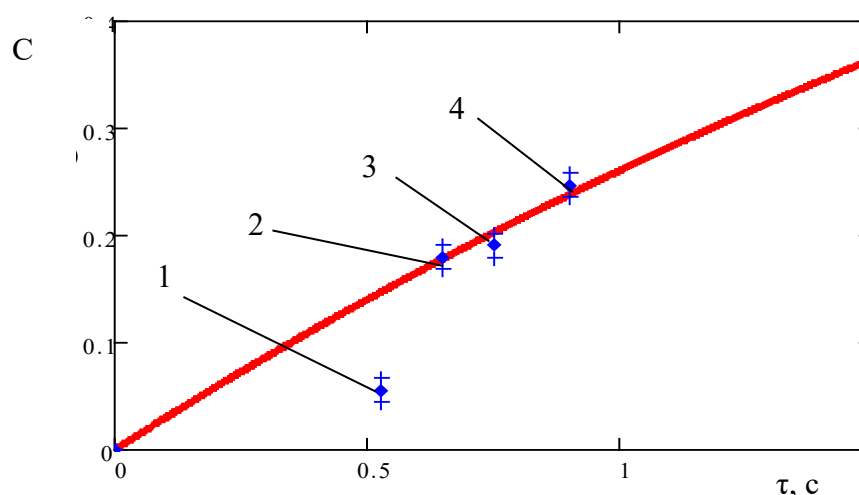


Рис. 4.2. Экспериментальные данные и аппроксимирующая кривая, описывающие изменение относительного выхода летучих из угля во времени при предварительном контакте с горячим воздухом (1 – для горелки №5, 2 – №1, 3 – №7, 4 – №9).

5. Сопоставляются значения расчетного и табличного значений критерия Фишера и делается вывод об адекватности уравнения регрессии.

Применительно к рассматриваемой задаче получены следующие результаты:

- дисперсия адекватности $S_{ад}=1,138 \cdot 10^{-4}$ для $n=3, l=1$
- дисперсия воспроизводимости $S_v=3.156 \cdot 10^{-4}$
- расчетное значение критерия Фишера $F=0.361$
- табличное значение критерия Фишера $F_{\alpha}=6.94$

Поскольку расчетное значение критерия Фишера меньше табличного, можно утверждать, что полученное для описания процесса возгонки летучих уравнение регрессии адекватно описывает процесс.

При построении аппроксимирующей кривой (рис 4.2) выполнено экстраполирование за рассмотренное в экспериментах предельное значение времени (0,9с). Такой подход представляется возможным, поскольку вид экстраполирующего участка кривой вполне согласуется с представлениями о выходе летучих веществ из твердого топлива [37]. Из анализа поведения аппроксимирующей кривой в промежутке времени 0,9-1,5с можно сделать вывод, что дополнительным резервом дальнейшего снижения механического недожога является удлинение времени теплового контакта ПУТ с горячим воздухом, например, за счет удлинения ПВК, идущих на наиболее близкие к АПП горелки.

4.4 Обоснование полученных результатов

Для объяснения влияния более раннего контакта пыли с горячим первичным воздухом на снижение величины механического недожога предложена следующая схема. Известно, что летучие, выделившиеся при низких температурах относятся в основном к метановой группе [37]. Они хорошо перемешиваются с первичным воздухом еще до поступления в топочное пространство. При догреве этой смеси от температуры поступления в топку на 200-300°C происходит воспламенение этой смеси и выделение теплоты. Для

оценки влияния этого процесса на ход воспламенения частиц выполнена простая расчетная оценка: если считать что выделившиеся летучие представлены одним метаном, то выделение энергии от сжигания метана в количестве 1,75% от массы топлива (как для горелок №1 и №7) достаточно для подъема температуры частицы и соответствующей ей массы первичного воздуха на 400-450°C. Естественно вычленение процесса сгорания летучих, выделившихся при транспорте пыли к горелке, и ее использования для догрева частиц из общей совокупности процессов носит достаточно условный характер. Так, например, при нагреве сред, поступающих в котел, продолжается выделение летучих. Однако выполненная расчетная оценка однозначно показала, что выделение 20-30% летучих в трубопроводе подачи горячего воздуха позволяет существенно ускорить воспламенение частиц угольной пыли и тем самым снизить потери с механическим недожогом.

При помощи математической модели процесса выгорания ПУТ, представленной в работе [109] показано, что для условий эксплуатации котла ТП-100 в номинальном режиме, для снижения мехнедожога на 1% время выгорания частиц должно увеличиться примерно на 0,5 с. Этот результат достаточно логичен, так как, с одной стороны, полученное уменьшение времени задержки воспламенения ($\Delta\tau_3$) должно быть сопоставимо со средним временем контакта ПУТ и горячего воздуха (τ_k), а, с другой стороны, в виду достаточно низкой температуры в ПВК, $\Delta\tau_3$ получается меньше, чем время τ_k .

Выводы по разделу 4

– на практике доказано существенное снижение механического недожога при сжигании ПУТ в топках энергетических котлов при обеспечении предварительного теплового контакта горячего первичного воздуха и пыли из АПП;

– в результате определения общего содержания влаги и летучих в пробах установлено, что за время контакта с горячим воздухом от 0.5 до 0.9 с общее влагосодержание уменьшилось на 4-48%, а летучих на 6-25%;

– обосновано, что основной причиной снижения механического недожога является выделение летучих веществ из топлива до попадания ПУТ в топочное пространство котла, выделение энергии от сжигания которых в топке котла ускоряет выделение оставшейся части летучих веществ, прогрев частицы и ее воспламенение, то есть приводит к уменьшению времени задержки воспламенения;

– дополнительным резервом дальнейшего снижения механического недожога является удлинение времени теплового контакта ПУТ с горячим воздухом, например, за счет удлинения ПВК, идущих на наиболее близкие к АПП горелки.

ГЛАВА 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО НЕДОЖОГА ПРИ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ ПУТ ОТ СТЕПЕНИ ГАЗОПЛОТНОСТИ ТОПКИ

5.1 Постановка задачи

Одним из направлений решения задач повышения КПД энергетических парогенераторов является применение газоплотных топок. На практике установлено, что в этом случае удастся добиться повышения КПД котла на 1-2% в первую очередь за счет уменьшения потерь теплоты с продуктами сгорания [117]. Также имеется мнение, что использование газоплотных топок позволит уменьшить величину механического недожога. Поскольку переход на газоплотные топки является достаточно затратным мероприятием, необходимо детальное исследование всех аспектов их использования.

Целью данного раздела диссертационной работы является определение механического недожога при факельном сжигании пылеугольного топлива в топках энергетических котлов в зависимости от степени газоплотности топки.

На стадии предварительного качественного анализа данного вопроса логично ожидать, что при исключении (уменьшении) присосов холодного воздуха в топку будет иметь место повышение калориметрической и действительных температур в топочном пространстве, что благоприятно для улучшения выгорания топлива, поскольку возрастают значения констант скорости реакций горения. Но с другой стороны можно предположить понижение концентрации кислорода в газовой смеси на стадии догорания частиц топлива перед выходом из топки, что ухудшает условия, при которых происходит выгорание.

Однако в настоящее время в подавляющем большинстве случаев управление работой дутьевых вентиляторов (ДВ) ведется не по принципу вычисления необходимого расхода воздуха в зависимости от массового расхода топлива для обеспечения заданного значения α_r , а по принципу обеспечения

заданной концентрации остаточного кислорода в продуктах сгорания за котлом. Таким образом, некоторая часть воздуха поступает в топку путем присоса и через систему пылеприготовления, а основная часть воздуха подается ДВ. То есть количество воздуха, поступившего в топку, остается одним и тем же, но меняется соотношение горячего вентиляторного воздуха и холодного присосанного воздуха. В пределе при использовании идеально газоплотной топки весь воздух на горение поступает только от ДВ и системы пылеприготовления.

Заданные значения концентрации остаточного кислорода в продуктах сгорания за топкой, как правило, устанавливаются на уровне 3,5-6% в зависимости от тепловой нагрузки котла, при этом большим значениям тепловой нагрузки соответствуют меньшие значения концентрации кислорода.

Коэффициент расхода воздуха, обеспечивающий заданную концентрацию кислорода в продуктах сгорания, можно рассматривать как полный коэффициент расхода воздуха, который складывается из коэффициента расхода воздуха, формируемого вентилятором α_v , притока воздуха через систему пылеприготовления $\Delta\alpha_{пп}$ и присоса воздуха в топку $\Delta\alpha_t$.

5.2 Методика исследования влияния степени газоплотности топки на величину механического недожога

Практический интерес для анализа представляют значения суммы холодных притоков $\Delta\alpha_t + \Delta\alpha_{пп}$ от 0,05 до 0,15. Поскольку в случае идеально газоплотной топки ($\Delta\alpha_t=0$) она равна приходу воздуха через систему пылеприготовления ($\Delta\alpha_{пп}=0,05$), а при использовании обычно негерметичной топки ($\Delta\alpha_t=0,1$) получаем значение 0,15. Для более широкого анализа нижний диапазон $\Delta\alpha_t + \Delta\alpha_{пп}$ в данной работе зафиксирован на уровне нуля.

Исследование проведено для следующего набора исходных данных. Котлоагрегат, для условий которого производятся расчеты и моделирование – ТП-109. Состав угля, %: $C^r=90$; $H^r=4$; $N^r=0,94$; $O^r=4$; $S^r=1,06$; $A^c=19$; $W^p=0,7$. Фракционный состав топлива приведен в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Фракционный состав топлива для моделирования процесса выгорания топлива в топке энергетического котла.

№ п/п	Класс крупности, мм	Массовая доля, %
1	0,16-0,125	2,1
2	0,125-0,104	4
3	0,104-0,083	4
4	0,083-0,063	3,9
5	0,063-0,040	10,4
6	0,040-0	75,6
Итого		100,0

При помощи стандартных зависимостей, используемых в теории горения топлива, установлено, что для обеспечения 3,5% остаточного кислорода в уходящих продуктах сгорания с учетом ожидаемого недожога порядка 3% для выбранного состава топлива необходимое значение коэффициента расхода воздуха α_T составляет 1,19.

Время выгорания коксового остатка по опыту работы [102] установлено на уровне 3 с.

Исследование проведено по следующей схеме:

- величина α_T зафиксирована на уровне 1,19. Для проведения численных экспериментов сумма дополнительных поступлений воздуха $\Delta\alpha_{\text{пп}} + \Delta\alpha_T$ меняется от 0 до 0,15 с шагом 0,01. При этом коэффициент расхода воздуха, формируемый при помощи ДВ, определяется как $\alpha_T - (\Delta\alpha_{\text{пп}} + \Delta\alpha_T)$.

- для каждого случая определяется адиабатическая температура горения T_a при помощи стандартных зависимостей в зависимости от полезного тепловыделения [110];

- для каждого случая определяется температура продуктов сгорания на выходе из топки θ_T'' (°C) при помощи набора зависимостей, предложенных в

Нормативном методе расчета парогенераторов для расчета теплообмена в топках [111]:

$$\theta_T'' = \frac{T_a}{M \cdot \left(\frac{C_0 \cdot \psi_{cp} \cdot F_{ст} \cdot a_T \cdot T_a^3}{10^{11} \cdot \varphi \cdot B_p \cdot V \cdot c_p} \right)^{0,6} + 1} - 273 ; \quad (5.1)$$

где M – коэффициент, учитывающий характер распределения температуры в топочном пространстве;

$C_0 = 5,67$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴);

ψ_{cp} – среднее значение коэффициента тепловой эффективности лучевоспринимающих поверхностей;

$F_{ст}$ – полная площадь стен топки, м²;

a_T – степень черноты топки;

φ – коэффициент сохранения тепловой энергии;

B_p – расход топлива, кг/с;

V – выход продуктов сгорания с единицы топлива, м³/кг;

c_p – объемная теплоемкость продуктов сгорания, Дж/(м³·К).

– далее при помощи последовательности действий, предложенной в [37] и основывающейся на использовании специальных номограмм, определяем среднюю температуру факела в зависимости от безразмерной температуры уходящих газов;

– определяем значения константы скорости реакции окисления углерода до углекислоты [37]:

$$k = 4.5 \cdot 10^4 \cdot \exp\left(-\frac{140.3 \cdot 10^3}{8.31 \cdot T_\phi}\right); \quad (5.2)$$

– при помощи усовершенствованной в данной диссертации математической модели расчета выгорания полифракционного факела определяем механический недожог [102,119].

5.3 Результаты исследования

Результаты расчетов и моделирования представлены на рис. 5.1 – 5.6.

Из анализа информации о зависимости адиабатной температуры горения от величины присосов (рис. 5.1) видно, что эта величина во всем диапазоне изменения аргумента меняется от 2348 до 2317 К. Расчетное значение температуры продуктов сгорания на выходе из топки линейно уменьшается на 5 градусов в диапазоне изменения присосов от 0 до 0,15 (рис. 5.2). В то же время такая важная величина как безразмерная температура уходящих из топки газов незначительно увеличивается по мере роста присосов в пределе от 0,57 до 0,576 (рис 5.3). Причиной этого заключается в большем темпе падения T_a , чем T_{yx} в исследованном диапазоне изменения присосов.

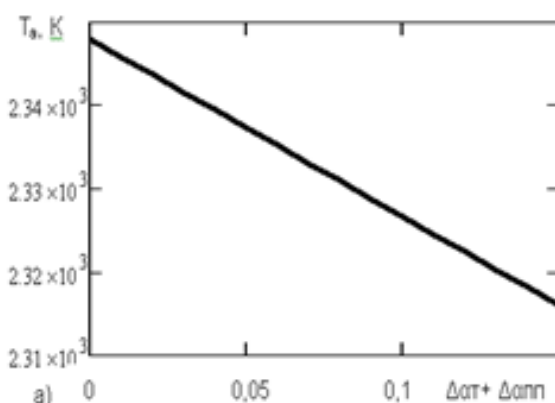


Рис 5.1. Зависимость адиабатной температуры горения от уровня присоса воздуха в топку.

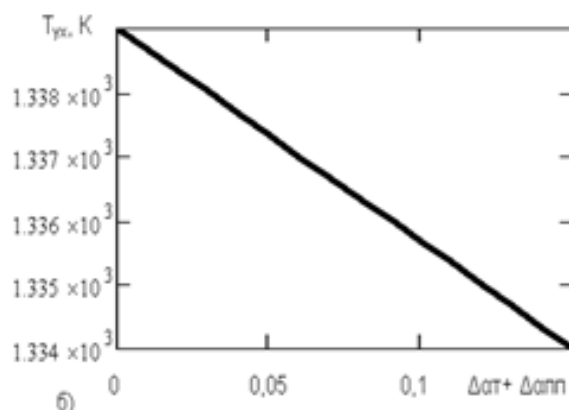


Рис 5.2. Зависимость температуры газов на выходе из топки от уровня присоса воздуха в топку.

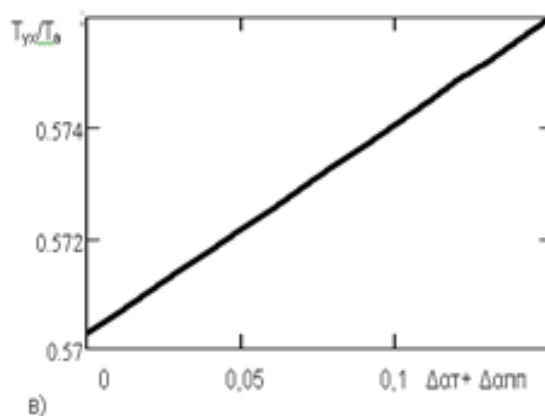
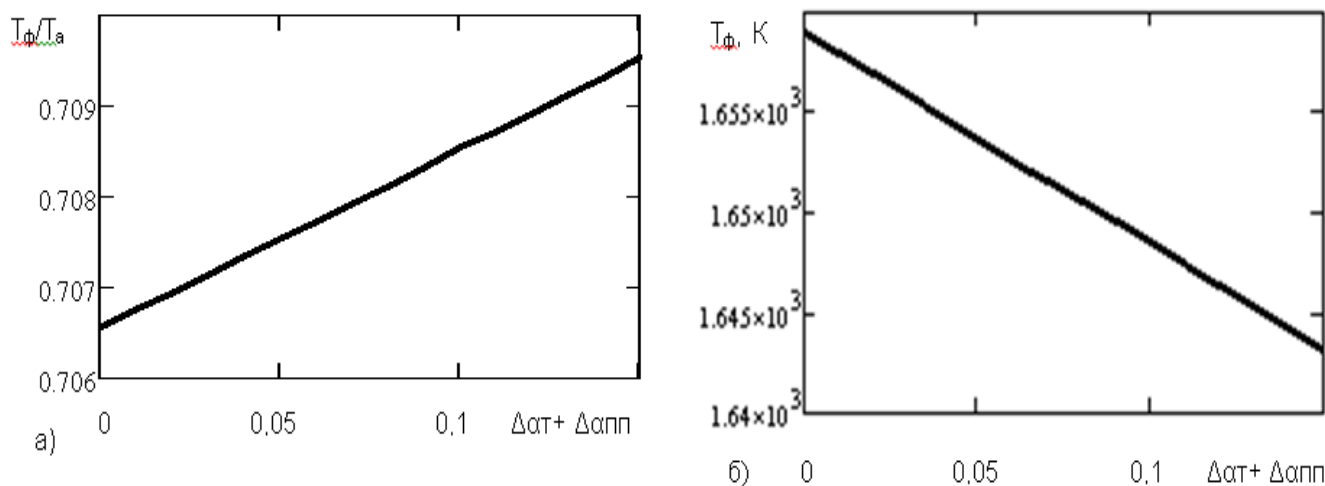


Рис 5.3. Зависимость безразмерной температуры газов на выходе из топки от уровня присоса воздуха в топку.

Зависимость характерных температур факела представлена на рис. 5.4. Несколько неожиданным является закономерность, согласно которой средняя безразмерная температура факела увеличивается по мере роста присосов (рис 5.4а), в то время как абсолютное значение средней температуры факела в исследованном диапазоне изменения присосов уменьшается на величину порядка 18 градусов.



а – безразмерная средняя температура; б – абсолютное значение действующей факела температуры факела

Рис. 5.4. Зависимость средней (действующей) температуры факела от уровня присоса воздуха в топку.

Зависимость константы скорости реакции выгорания углерода от коэффициента присоса воздуха в топку (поскольку последний определяет среднюю температуру факела) представлены на рис. 5.5.

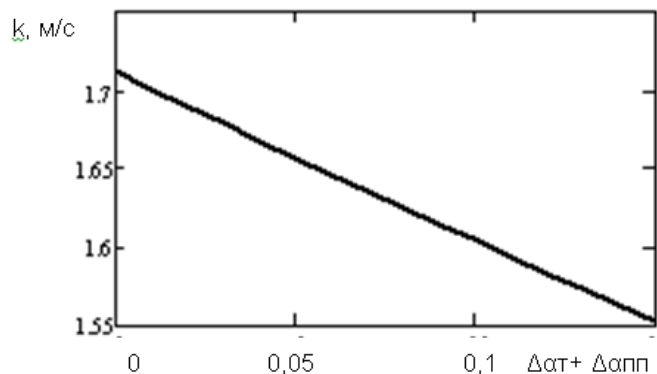


Рис. 5.5. Зависимость константы скорости реакции окисления углерода от уровня присоса воздуха в топку.

Определенная при помощи усовершенствованной математической модели выгорания полифракционного факела ПУТ зависимость механического недожога от коэффициента присоса воздуха в топку представлена на рис. 5.6.

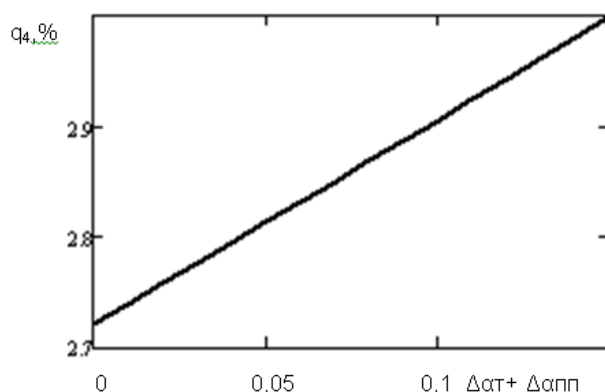


Рис. 5.6. Зависимость величины механического недожога от уровня присоса воздуха в топку.

Из анализа результатов расчетов, представленных на рис. 5.1 – 5.6, можно заключить, что между характерными значениями $\Delta\alpha_t + \Delta\alpha_{пп}$, составляющими 0,05 и 0,15, адиабатная температура горения линейно меняется от 2337 до 2317 К, а температура уходящих газов незначительно меняется в диапазоне 1337 – 1334 К.

При таком отличии темпов спада характерных температур в топке логичным является результат, согласно которому относительная температура уходящих газов при понижении степени газоплотности увеличивается с 0,572 до 0,576, что соответствует крайне незначительному увеличению безразмерной температура факела в пределах 0,707-0,709; зато абсолютное значение средней температуры факела понижается от 1654 до 1643К, что приводит к снижению значения константы скорости реакции с 1,66 до 1,55 м/с. Механический недожог при таком понижении газоплотности увеличивается с 2,8 до 3,0 %.

Таким образом, переход от обычной топки к газоплотному исполнению позволяет сократить механический недожог топлива на 0,2%. Этот результат объясняется увеличением средней температуры факела при сохранении концентрации кислорода в топке.

Выводы по разделу 5

При увеличении газоплотности топки сокращается присос воздуха в топку. При управлении работой ДВ по принципу обеспечения заданной концентрации кислорода на выходе из топки снижение присосов приведет к увеличению доли горячего вентиляторного воздуха. Это в пределе приводит к увеличению адиабатной температуры горения на величину порядка 20°C и незначительному повышению температуры уходящих газов порядка 3°C. При этом средняя температура факела увеличивается на 11°C. Таким образом, это позволяет увеличить значение константы скорости реакции на 7% и получить снижение механического недожога на 7%. Этот результат является вполне ощутимым и дополняет основной положительный эффект, получаемый от перехода на газоплотные топки, связанный со снижением потерь теплоты с уходящими газами.

ГЛАВА 6

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗРАБОТОК

6.1 Экологические показатели

Работа выполнена на основании [118]. Выполнение прямых инструментально-лабораторных измерений и определение величин выбросов загрязняющих веществ расчетным методом до и после внедрения предлагаемых в диссертации разработок проведено с использованием типовых методик, согласованных в 2010 г. с органами Минэкобезопасности Украины:

- Методика определения запыленности методом внутренней фильтрации.
- Руководство по аналитическому контролю газовых выбросов в атмосферу производств товаров бытовой химии.
- Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения.
- Руководство по контролю источников загрязнения атмосферы.
- Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей.
- Методические указания по испытаниям золоулавливающих установок тепловых электростанций.
- Руководство по качеству производственной службы охраны окружающей среды.
- Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами.
- Методическое пособие по расчёту выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов.

Газовый анализ выполнялся с помощью многокомпонентного газоанализатора «Testo-350», погрешность $\pm 5\%$, позволяющий определять содержание кислорода (O_2), оксида углерода (CO), оксидов азота (NO_x) и сернистого ангидрида (SO_x) и температуру газов. Газоанализатор Testo 350 внесён

в государственный реестр и прошёл метрологическую аттестацию. Принцип измерения концентрации газов – электрохимический.

Скорость потока газа измерялась с помощью приемников полного и статического давлений конструкции НИИОГАЗ и Прандтля (Приложение Е) погрешностью $<7,5\%$; микроманометра ММН 240 с погрешностью 1% от верхнего предела, крыльчаткой с погрешностью $\pm 5\%$ и зондом с обогреваемым шариком с погрешностью $0,01$ м/с (от $0-1,99$ м/с), $0,02$ м/с (от $2-5$ м/с), $0,04$ м/с (от $5-20$ м/с) к прибору «Testo-350».

Геометрические размеры газоходов измерялись с помощью рулетки с предельно допустимой погрешностью $0,5$ мм.

Объем уходящих газов определялся как произведение площади поперечного сечения газоходов в месте измерения на усредненную скорость газовоздушного потока [120].

Температура измерялась с помощью термометра ТТ и термометра ТЛ-4, погрешность $\pm 0,4\%$ и Testo 350 с погрешностью $0,5\%$ от измеренного значения.

Барометрическое давление во время опытов измерялось барометром-анероидом БАММ-1.

Запыленность потока определялась с помощью пылезаборной трубки с набором наконечников, методом внутренней фильтрации [121] и электроаспиратором "Тайфун" погрешность $\pm 7\%$.

Взвешивание патронов осуществлялось на аналитических весах WA-21 и набором гирь Г-2-210.

Для измерения продолжительности опытов использовался секундомер, 3 класс.

Оценка точности результатов измерений выполнялась с использованием распределения Стьюдента [122].

Мощность выброса загрязняющего вещества (максимальная, минимальная) определялась по формуле:

$$M = \frac{C \cdot V}{1000}, \text{ г/сек;} \quad (6.1)$$

где C — усредненная максимальная либо минимальная концентрация вещества (мг/м^3);

V — объемный расход газовой смеси при н.ф.у., $\text{м}^3/\text{с}$.

До начала проведения инструментальных замеров были произведены ремонт и наладка технологического и пылегазоулавливающего оборудования силами ремонтного и наладочного персонала станции.

Измерения проводились до внедрения всех конструктивных изменений в конструкцию котла, а также после замены газоплотной топки и основных горелок и после изменения схемы трассировки пылепроводов высокой концентрации. Полученные результаты внесены в таблицу 6.1.

Выбросы оксидов углерода, окислов азота, диоксида серы и пыли в дымовых газах не превышает действующие разрешённые выбросы.

При замене основных горелок на лопаточно-улиточные, щелевой топки на газоплотную и изменения схемы врезки ПВК в первичный воздухопровод оксид углерода, окислы азота и диоксид серы практически не изменился. При этом концентрация золы в дымовых газах уменьшилась почти в 1.5 раза (от 4079 мг/м^3 до 2746 мг/м^3), запылённость дымовых газов снизилась почти в два раза (от $37,80 \text{ мг/м}^3$ до $19,73 \text{ мг/м}^3$), мощность выбросов золы в атмосферу уменьшалась соответственно на 40 % (от $700,9 \text{ г/с}$ до $419,0 \text{ г/с}$).

Таблица 6.1. Экологические показатели до и после внедрения мероприятий.

Наименование величины	Единица измерения	до внедрения изменений	После замены газоплотной топки и основных горелок	После изменения схемы трассировки ПВК
Электрическая нагрузка	МВт	200	200	200
NO _x	мг/м ³	1245	1221	1180
SO _x	мг/м ³	3827	3843	3889
CO	мг/м ³	64,9	63,2	60
Зола	мг/м ³	4079	3252	2746
запыленность дымовых газов за котлом	мг/м ³	37,8	25,94	19,73
мощность выброса золы в атмосферу	г/с	700,9	566,3	419

6.2 Экономический эффект

В период внедрения изменений в конструкцию котла (с 2010 по 2016 год) качество твердого топлива имело следующий диапазон качественных характеристик:

- низшая теплота сгорания рабочего топлива 5117 – 5614 ккал/кг;
- зольность на рабочую массу 19,8 – 24,7 %;
- влажность рабочая 9,6 – 11,8 %;
- выход летучих веществ на горючую массу 4,6 – 7,2 %.

Для анализа были взяты основные показатели работы котла энергоблоков № 9, 11 и 12, которые прошли все три ступени модернизации (замена горелок, модернизация топки и изменение схемы врезки ПВК в первичный воздухопровод) такие как:

- содержание механического недожога топлива (Таблица 6.2);
- температура острого пара (Таблица 6.3);
- температура вторичного пара (Таблица 6.4);
- КПД котла (Таблица 6.5).

Таблица 6.2. Содержание механического недожога топлива.

№ блока	Мех. недожог до мероприятия, %	Мех. недожог после мероприятий, %		
		замена горелок	замена на газоплотную топку	переврезка ПВК
9	8,4	6,3		4,2
11	8,0	6,6	4,8	3,7
12	9,5	6,4	3,8	

Таблица 6.3. Температура острого пара.

№ блока	до мероприятия, %	после мероприятий, %		
		замена горелок	замена на газоплотную топку	переврезка ПВК
9	529,6	530,8		525,6
11	536,6	530,3	535,9	545,0
12	530,5	536,6	544,8	

Таблица 6.4. Температура вторичного пара.

№ блока	до мероприятия, %	после мероприятий, %		
		замена горелок	замена на газоплотную топку	переврезка ПВК
9	530,5	537,2		523,1
11	541,6	526,2	531,9	537,9
12	527,0	533,1	536,4	

Таблица 6.5. КПД котла.

№ блока	до мероприятия, %	после мероприятий, %		
		замена горелок	замена на газоплотную топку	переврезка ПВК
9	79,2	83,6		85,6
11	84,1	82,8	86,5	87,1
12	80,7	84,0	87,5	

Замена основных горелок, модернизация топки и схемы врезки ПВК в первичный воздухопровод привела к существенному снижению расхода природного газа на выработку 1 кВт·ч электрической энергии, данные предоставлены в табличной форме (таблица 6.6) и с помощью графика на Рис. 6.1.

Таблица 6.6. Доля расхода природного газа.

ГОД	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Доля расхода газа, %	6,96	4,76	2,64	2,53	1,97	0,47	0,30

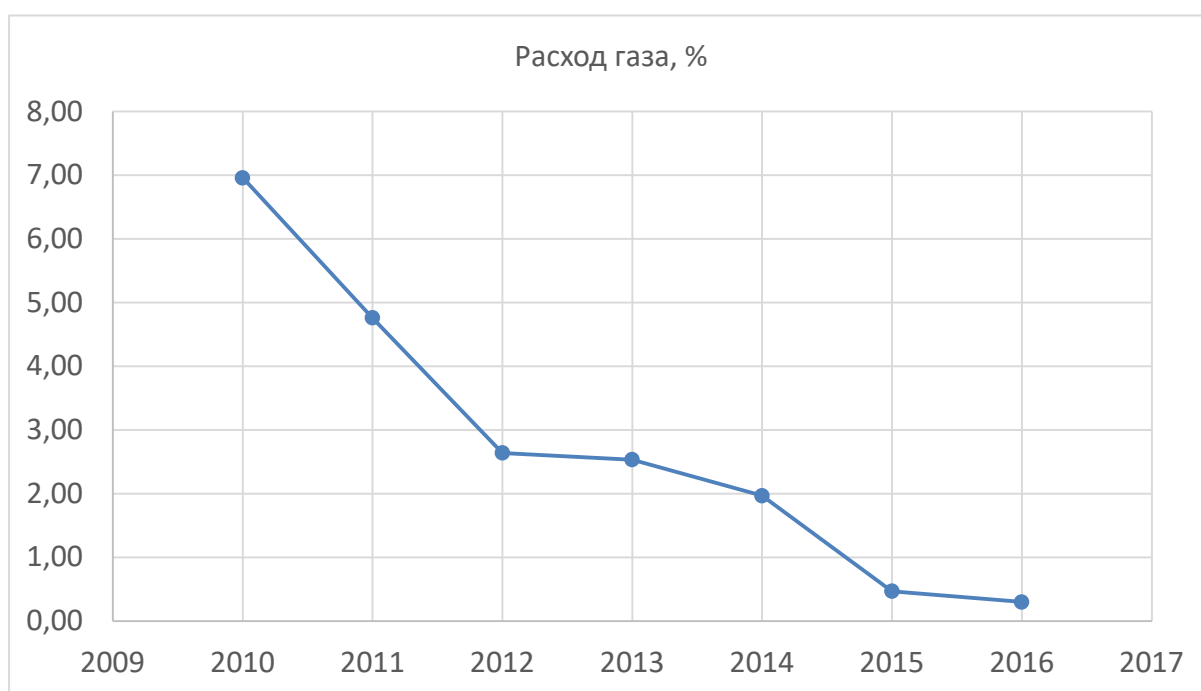


Рис. 6.1. Расход природного газа.

Анализ расхода природного газа на подсветку твердого топлива уменьшился с 7% до 0,3% от общего расхода топлива на несение электрической нагрузки. Природный газ используется исключительно на пуск энергоблока, на несение электрической нагрузки природный газ не используется.

Уменьшение доли расхода природного газа на выработку 1 кВт·ч электрической энергии, уменьшение присосов холодного воздуха, а так же уменьшение мехнедожога в результате более тщательного выжига углерода в процессе горения топлива привели к уменьшению удельного расхода топлива, который снизился с **425 г/кВт·ч до 385 г/кВт·ч**. При условии, что стоимость 1 т твёрдого топлива составляет в 2018 году примерно 1500 российских рублей, то можно рассчитать себестоимость 1 кВт·ч. Данные удельного расхода топлива с 2010 года по 2016 год и соответственно себестоимость 1 кВт·ч рассчитанная в ценах 2018 года представлены в табличной форме (таблица 6.7).

Таблица 6.7. Удельный расход топлива.

ГОД	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Удельный расход топлива, г/кВт·ч	425	420	418	416	414	406	385
Себестоимость 1 кВт·ч/рос. руб.	0,638	0,630	0,627	0,624	0,621	0,609	0,578

Таким образом, при условии внедрения предложенных конструктивных решений, себестоимость 1 кВт·ч снизиться на 0,06 рос. руб. с 0,638 рос. руб до 0,578 рос. руб. Если учесть, что в 2018 году было Старобешевская ТЭС выработала 7 445 612 тыс.кВт·ч, то мы получим экономию за год в 446 736 720 рос. руб.

В качестве рекомендации для реконструкции котлов типа ТП-100, работающих на низкорреакционном топливе, в условиях других ТЭС предлагается

следующий набор опробованных и исследованных в данной диссертационной работе мероприятий:

1) Замена двухулиточных пылегазовых горелок, выполненных по проекту СКБ ВТИ, на улиточно-лопаточные двухканальные по вторичному воздуху, которые максимально соответствуют требованиям отраслевого стандарта ОСТ 108.030.26–78;

2) Изменение схемы подачи угольной пыли высокой концентрации путём переврезки ППВК в трубопроводы первичного воздуха к горелкам котла.

3) Замена обычных щелевых топок на газоплотные.

Выводы по разделу 6

1. В экологическом плане реализация мероприятий, предложенных в диссертации, позволила достичь следующих основных результатов: запыленность дымовых газов за котлом уменьшалась почти в два раза с $37,8 \text{ мг/м}^3$ до $19,73 \text{ мг/м}^3$; мощность выброса золы в атмосферу также уменьшилась почти в два раза с $700,9 \text{ г/с}$ до 419 г/с .

2. В экономическом плане достигнут результат, заключающийся в том, что удельный расход топлива снизился с $425 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ до $385 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$, при этом себестоимость $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ снизилась на $0,06 \text{ рос. руб.}$ с $0,638 \text{ рос. руб.}$ до $0,578 \text{ рос. руб.}$. В результате за 2018 год экономия денежных средств, достигнутая за счет реализации исследованных мероприятий составила $446\,736\,720 \text{ рос. руб.}$

3. В данной работе предложено усовершенствование котлов ТП-100 путем применения улиточно-лопаточных горелок и совершенствование их параметров, изменение схемы подачи угольной пыли высокой концентрации путём переврезки ППВК в трубопроводы первичного воздуха к горелкам котла, а так же замена щелевых топок на газоплотные. Выполнение этих мероприятий приведёт к снижению удельного расхода топлива на производство электрической энергии за счет:

- снижения содержания горючих в уносе предположительно до 10%;

- снижения расхода природного газа на подсветку факела и эффективность сжигания совместно в одной горелке два вида топлива, основного – твердого топлива (угольная пыль) и подсветочного – природного газа либо мазута;
- снижения присосов холодного воздуха в топку котла до 5 %;
- снижение потерь теплоты с уходящими газами.

ВЫВОДЫ

1. На основе аналитического обзора по проблемам совершенствования технологий сжигания ПУТ обоснована необходимость совершенствования известной упрощенной модели выгорания частицы угольной пыли для обеспечения возможности ее использования для исследования выгорания полифракционного ПУТ; сделан вывод о важности исследования параметрической чувствительности модели и создания типового способа адаптации усовершенствованной математической модели к произвольным конкретным условиям; обоснована необходимость определения констант скорости процесса возгонки летучих при обеспечении предварительного контакта ПУТ с горячим воздухом; сделан вывод о необходимости расчетного исследования глубины выгорания ПУТ от степени газоплотности топки.

2. Усовершенствована известная упрощенная математическая модель выгорания полифракционного ПУТ в факеле, что позволило одновременно учесть особенности выгорания каждой из фракций угольной пыли, определяемые ее средним размером и зольностью. Усовершенствованная модель представлена системой обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих изменение размера частиц каждой из выделенных для рассмотрения фракций.

3. Доказано существенное влияние количества выделенных для рассмотрения фракций на величину установленного при помощи математической модели механического недожога. Так, при проведении численного моделирования разделение фракции классом крупности 0,125 – 0,063 на три более узкие фракции с равномерным распределением массы частиц внутри них привело к росту расчетного значения величины механического недожога на 11%.

4. В результате исследования параметрической чувствительности математической модели выгорания полифракционного факела установлено, что наиболее значительное влияние на результаты моделирование оказывает задание

плотности коксового остатка и температуры продуктов сгорания при условии её прямого учёта на значение константы скорости реакции. В исследованных диапазонах названных величин для плотности коксового остатка остаточный углерод увеличивается на 4%, а для температуры продуктов сгорания уменьшается на 17% на каждый процент роста значений этих величин. Также установлено, что учёт реального закона изменения температуры в топке позволяет уточнить результаты на величину порядка 5%. Для остальных исследованных параметров (диффузионное число Нуссельта, коэффициент молекулярной диффузии и константа скорости реакции при её прямом задании) установлено, что погрешность определения остаточного углерода составляет порядка 1-2% на каждый процент неточности задания названных параметров.

5. Предложен способ определения времени задержки воспламенения ПУТ в конкретных условиях, основанный на использовании усовершенствованной математической модели и фактического установленного значения механического недожога. Установленные значения времени задержки воспламенения используются для адаптации модели в любых конкретных условиях.

6. Установлено, что до реконструкции горелок парогенераторов ТП-109 Старобешевской ТЭС время задержки воспламенения составляло от 0,9 до 1,2 с, а после замены горелок на лопаточно-улиточные с усовершенствованными параметрами крутки оно составляет 0,41-0,51 с. Это позволило увеличить время горения пыли на 0,39-0,76 с, что и объясняет экспериментально зафиксированное сокращение механического недожога на 1,4-3,1%.

7. На практике доказано существенное снижение механического недожога при сжигании ПУТ в топках энергетических котлов при обеспечении предварительного теплового контакта горячего первичного воздуха и пыли из АПП. Выявлено, что основной причиной снижения механического недожога является выделение летучих веществ из топлива до попадания ПУТ в топочное пространство котла, выделение энергии от сжигания которых в топке котла ускоряет выделение оставшейся части летучих веществ, прогрев частицы и ее

воспламенение, то есть приводит к уменьшению времени задержки воспламенения.

8. Экспериментально установлено, что при обеспечении предварительного контакта ПУТ с горячим воздухом за счет переврезки ПШВК в условиях Старобешевской ТЭС константа скорости процесса возгонки летучих по однокомпонентной схеме составляет $0,302 \text{ с}^{-1}$.

9. Дополнительным резервом дальнейшего снижения механического недожога является удлинение времени теплового контакта ПУТ с горячим воздухом, например, за счет удлинения ПВК, идущих на наиболее близкие к АПП горелки.

10. При увеличении газоплотности топки сокращается присос воздуха в топку. При управлении работой ДВ по принципу обеспечения заданной концентрации кислорода на выходе из топки снижение присосов приведет к увеличению доли горячего вентиляторного воздуха. Это в пределе приводит к увеличению адиабатной температуры горения на величину порядка 20°C и незначительному повышению температуры уходящих газов порядка 3°C . При этом средняя температура факела увеличивается на 11°C . Таким образом, это позволяет увеличить значение константы скорости реакции на 7% и получить снижение механического недожога на 0,2-0,3%. Этот результат является вполне ощутимым и дополняет основной положительный эффект, получаемый от перехода на газоплотные топки, связанный со снижением потерь теплоты с уходящими газами.

11. На основе применения комплекса предлагаемых технологических приемов достигнуто снижение концентрации золы в дымовых газах от 4079 мг/м^3 до 2746 мг/м^3 , запылённость дымовых газов снизилась от $37,80 \text{ мг/м}^3$ до $19,73 \text{ мг/м}^3$, мощность выбросов золы в атмосферу уменьшалась от $700,9 \text{ г/с}$ до $419,0 \text{ г/с}$.

12. Результаты диссертационного исследования внедрены на Старобешевской ТЭС. Благодаря этому достигнуто снижение удельного расхода топлива с **425 г/кВт·ч** до **385 г/кВт·ч**. Таким образом, при условии внедрения предложенных конструктивных решений, себестоимость 1 кВт·ч снизилась на 0,06 рос. руб. с 0,638 рос. руб до 0,578 рос. руб. Если учесть, что в 2018 году было Старобешевская ТЭС выработала 7 445 612 тыс.кВт·ч, то годовая экономия составила 446 736 720 рос. руб.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аметистова, Е. В. Основы современной энергетики: в 2 т. / Е.В. Аметистова; том 1 под редакцией проф. А. Д. Трухня. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 376 с.
2. Конюшная, Ю. П. Открытия советских учёных. Ч. 1. / Ю. П. Конюшная. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 478 с.
3. Майстренко, А. Ю. Проведение балансовых испытаний на котлоагрегате ТП-100а энергоблока ст. №15 Луганской ТЭС для определения эффективности его работы на различных нагрузках при сжигании смеси антрацита и тощего угля с использованием технологии "X-Plate" / А. Ю. Майстренко. – Киев: ИУЭ.– 2011.– 25 с.
4. Чернявский, Н. В. Оценка нижнего предела мехнедожога при пылевидном сжигании украинских энергетических углей / Н. В. Чернявский, И. Л. Голенко, А. Ю. Провалов // Современная наука: Сб. научн. статей. – НПВК «Триакон». – 2011. – №3(8). – С. 68-73.
5. Веников, В. А. Введение в специальность: Электроэнергетика / В. А. Веников, Е. В. Пулятин. – М.: Высшая школа, 1988. – 239 с.
6. Михайлов, А. Малая энергетика России. Классификация, задачи, применение / А. Михайлов, А. Агафонов, В. Сайданов // Новости Электротехники: Информационно-справочное издание. – Санкт-Петербург, 2005. – № 5.– С. 16-23.
7. Аметистова, Е. В. Основы современной энергетики: в 2 т. / Е. В. Аметистова; том 2 под ред.: А. П. Бурмана, В. А. Строева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 632 с.
8. Справочник по проектированию энергетических систем / под ред.: С. С. Рокотьян, И. М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.
9. Маргулова, Т. Х. Атомные электрические станции / Т. Х. Маргулова. – М.: 1994. – 289 с.
10. Прохоров, А. М. Топка / А. М. Прохоров. – Изд. 3-е – М.: Советская энциклопедия, 1969-1978.– т. 24. –572 с.

11. Прохоров, А. М. Слоевая топка / А. М. Прохоров. – Изд. 3-е – М.: Советская энциклопедия, 1969-1978.– т.24. – 572 с.
12. Зах, Р. Г. Топочные устройства / Р. Г. Зах // Котельные установки. – М.: Энергия, 1968. – С. 53-75.
13. Прохоров, А. М. Шахтная топка / А. М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1969-1978.– т.24 – 572с.
14. Двойнишников, В.А. Конструкция и расчёт котлов и котельных установок / В. А. Двойнишников, Л. В. Деев, М. А. Изюмов. – М.: Машиностроение, 1988. – 264 с.
15. Верхотуров, М. В. Гравитационные методы обогащения: учеб. пособие для вузов / М. В. Верхотуров. – М.: МАКС Пресс, 2006. – 352 с.
16. Гейдон, А. Спектроскопия и теория горения / А. Гейдон. – М.: Издательство иностранной литературы, 1950. – 308 с.
17. Хитрин, Л. Н. Физика горения и взрыва / Л. Н. Хитрин – М.: Издательство Московского университета, 1957. – 452 с.
18. Щёлкин, К. И. Газодинамика горения / К. И. Щёлкин, Я. К. Трошин. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1963. – 254 с.
19. Льюис, Б. Горение, пламя и взрывы в газах / Б. Льюис, Г. Эльбе; пер. с англ. под ред.: К. И. Щёлкина, А. А. Борисова. 2-е изд. – М.: Мир, 1968. – 592 с.
20. Акмен, Р. Г. Топливо, основы теории горения и топочные устройства / Р. Г. Акмен. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – №5. – 68 с.
21. Винтовкин, А. А. Технологическое сжигание и использование топлива / А. А. Винтовкин. – М.: Теплотехник, 2005. – 288 с.
22. Лаутон, Дж. Электрические аспекты горения / Дж. Лаутон, Ф. Вайнберг. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
23. Похил, П. Ф. Методы исследования процессов горения и детонации / П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. М. Зайцев. – М.: Наука, 1969. – 301 с.
24. Гремячкин, В. М. О кинетике гетерогенных реакций углерода с кислородом при горении пористых частиц углерода в кислороде / В.М. Гремячкин // Физика горения и взрыва. – 2006. – №3.– С. 11-22.

25. Делягин, Г. Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха. Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий / Г. Н. Делягин. – М.: Наука, 1967. – 250 с.
26. Бабий, В. И. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела / В. И. Бабий, Ю. Ф. Куваев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
27. Мурко, В. И. Физико-технические основы водоугольного топлива / В. И. Мурко, В. И. Федяев, В. А. Хямяляйнен. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2009. – 195 с.
28. Канторович, Б. В. Введение в теорию горения и газификации твердого топлива / Б. В. Канторович. – М.: Metallurgizdat, 1960. – 356 с.
29. Головина, Е. С. Высокотемпературное горение и газификация углерода / Е. С. Головина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.
30. Самуйлов, Е. В. Модель и расчет процесса газификации одиночной углеродной частицы / Е. В. Самуйлов, М. В. Фаминская, Е. С. Головина // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40. – № 1. – С. 86–94.
31. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей. / Р. Рид, Т. Шервуд. – Л.: Химия, 1971. – 704 с.
32. Викторов, М. М. Методы вычисления физико-химических величин и прикладные расчеты / М. М. Викторов. – Л.: Химия, 1977. – 360 с.
33. Новожилов, Б. В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив / Б. В. Новожилов. – М.: Наука, 1973. – 176 с.
34. Асланян, Г. С. Численное исследование процессов тепло- и массообмена горячей угольной частицы / Г. С. Асланян, Л. Б. Директор // Теплофизика высоких температур. – 1991. – Т. 29. – № 3. – С. 570–576.
35. Зельдович, Я. Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 479 с.
36. «Правила організації технічного обслуговування та ремонту обладнання, будівель і споруд електростанцій та мереж». ГКД 34.20661 – 2003.

37. Померанцев, В.В. Приближенная методика расчета выгорания пылеугольного факела / В.В. Померанцев, С.Л. Шагалова, К.М. Арефьев // Теплоэнергетика. – 1958. – №11. – С. 33-41.
38. Правила техники безопасности при эксплуатации тепломеханического оборудования электростанций и тепловых сетей. Минэнерго СССР. М.: Энергоатомиздат, 1985.
39. Пасько, Б. И. Новые устройства для измельчения смерзшегося угля. Энергетик / Б. И. Пасько, Г. П. Берлявский, Л. А. Бойко // Электрические станции. – 1989. – № 5.– С. 20-27.
40. Пасько, Б. П. Новые инженерные решения при создании средств первичного измельчения угля на ТЭС. Энергетика и электрификация / Б.П. Пасько, Л.А. Бойко // Электрические станции. – 1990. – № 3. – С. 32-38.
41. Пасько Б.И. Установка первичного измельчения твердого топлива. Механизация и автоматизация производства / Б. И. Пасько, Г. П. Берлявский, Л. А. Бойко, В. Е. Саратов // Электрические станции. – 1989. – №11.– С. 15-23.
42. Берлявский, Г. П. Первичное измельчение твердого топлива на обогатительных фабриках и тепловых электростанциях / Г. П. Берлявский; Рукопись депонирована в ЦНИЭИуголь, 1989, № 5034.
43. Берлявский, Г. П. Новые устройства для измельчения угля на тепловых электростанциях. Энергетик / Г. П. Берлявский, Б. И. Пасько, Л. А. Бойко // Электрические станции.– 1990. – № 9.– С. 17-24.
44. Берлявский, Г. П. Результаты усовершенствования конструкции установки для первичного измельчения топлива. Энергетика и электрификация / Г. П. Берлявский, Б. И. Пасько, Л. А. Бойко, Н. И. Уварова // Электрические станции.– 1990. – № 1.– С. 16-24.
45. Головков Ю. П. Дробление твердого топлива на тепловых электростанциях [Текст] : научное издание / Ю. П. Головков. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 140 с.

46. Берлявский, Г. П. Эффективные средства первичного измельчения угля на тепловых электростанциях / Г. П. Берлявский, Б. И. Пасько, Л. А. Бойко, В. Е. Саратов. – Киев: Техника, 1992.– 215 с.
47. Михайлов, Н. М. Физические свойства топлива и борьба с затруднениями на топливоподаче электростанций / Н. М. Михайлов, А. Т. Шарков. – М.: Энергия, 1972. – 263 с.
48. Фильптинская, Э. П. Дробление угля на электростанциях / Э. П. Фильптинская, А. И. Москвин, Г. И. Ашмарина // Электрические станции. – 1989 –. № 6. – С. 23-31.
49. Хорин, В. Н. Определение производительности выемочных машин / В. Н. Хорин, Б. А. Верклов, В. Д. Иркиевский. – М.: Недра, 1977.– 80 с.
50. Шаранович, Г. А. Комплексная механизация и автоматизация выгрузки твердого топлива на электростанциях / Г. А. Шаранович. – Л.: Энергия, 1978.– 263 с.
51. «Тепловой расчет котла с замкнутой схемой пылеприготовления. КА 154 РР». СКБ ВТИ, 1978.
52. «Руководство по ремонту котельного оборудования электростанций. Ремонт горелок и форсунок». СПО ОРГРЭС, Москва, 1977.
53. «Горелки вихревые пылеугольные, пылегазовые и компоновка их с топками. Методы расчёта и проектирования». ОСТ 108.030.26–78.
54. «Тепловой расчет котельного агрегата типа ТП-100 при сжигании АШ с $Q_H^p = 5600$ ккал/кг». № К-202630ТКЗ, 1960.
55. Шейнман, Е. В. Пылегазо-воздухопроводы для тепловых электростанций / Е. В. Шейнман. – «Энергия» Ленинградское отделение, 1972. – 128 с.
56. Трёмбовля, В. И. Теплотехнические испытания котельных установок / В. И. Трёмбовля. – М., «Энергия», 1977. – 297 с.
57. «Котлы паровые стационарные. Правила разработки режимных карт» ГКД 34.26.503-96.
58. «Расход газомазутного топлива при сжигании на ТЭС Украины каменного угля с выходом летучих веществ меньше 20%. Нормы». ГКД 34.10.502-2003.

59. «Горелки вихревые пылеугольные, пылегазовые и компоновка их с топками. Методы расчета и проектирования» ОСТ 108.030.26-78.
60. ГКД 34.20661 Правила організації технічного обслуговування та ремонту обладнання, будівель і споруд електростанцій та мереж – 2003.
61. Паули, В.К. Сборник работ по совершенствованию управления надежностью энергетического оборудования / В.К. Паули. – К Всероссийскому совещанию по повышению эффективности, надежности и безопасности энергопроизводства 24-25 ноября 1999 г. – М.: РАО ЕЭС России, 1999. – 181с.
62. Усмонов, Н. О. Особенности использования парогазовых установок на ТЭС / Н. О. Усмонов, Ф. Ш. Умарджанова // Молодой ученый. – 2016. – № 11 (115). – С. 518-522.
63. Частухина, В.И. Тепловой расчет промышленных парогенераторов / В.И. Частухина. – К.: Вища школа, 1980. – 182 с.
64. Померанцев, В.В. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др.; под ред. В.В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
65. Смородин, С.Н. Котельные установки и парогенераторы: учеб.пособие. 2-е изд-е, испр. / С.Н. Смородин, А.Н. Иванов, В.Н. Белоусов. – ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2018 – 185 с.
66. Сидельковский, Л.Н. Котельные установки промышленных предприятий.– 3-е, перераб. / Л.Н. Сидельковский, В.Н. Юренев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 356-358 с.
67. Томилов, В.Е. Эффективность пылеугольных ТЭЦ с новыми экологообеспечивающими технологиями / В.Е. Томилов [и др.]. – Новосибирск: Наука; Сиб. изд. фирма РАН, 1999. – 97 с.
68. Карпенко, Е.И. Экологоэкономическая эффективность технологий переработки твердых топлив / Е.И. Карпенко, В.Е. Мессерле, В.Н. Чурашев. – Новосибирск: Наука, Сиб. изд. фирма РАН, 2000. – 194 с.
69. Родатис, К.Ф. Котельные установки. Т. 2. / К.Ф. Родатис [и др.]. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1946. – 471 с.

70. Берг, Б.В. Растопка пылеугольных котлов с пониженным расходом мазута: Материалы всесоюзной конференции / Б.В. Берг, А.Батхишиг, В.А. Микула // Сборник трудов 3-й научно-практ. Конф. Т. 2. – Благовещенск, 2003. – С. 284-290.
71. Буянтуев, С.Л. Применение плазменных пылеугольных горелок на котле ТПЕ-185 Улан-Удэнской ТЭЦ / С.Л. Буянтуев, А.В. Елисафенко, С.М. Легостаев // Энергетик. – 2003. – № 3. – С. 13-15.
72. Мессерле, В.Е. Состояние и перспективы освоения плазменных технологий безмазутного воспламенения углей в энергетике / В.Е. Мессерле // Материалы 2-го международного симпозиума по теоретической и прикладной термохимии (15 ТАРС-95). – Иваново: ИГХТА, 1995. – С. 17-21.
73. Грачев, С.П. Технология SONOX для снижения выбросов оксида серы и азота на тепловых электростанциях / С.П. Грачев // Энергохозяйство за рубежом – 1992. – № 2. – С. 11-15.
74. Жуков, М.Ф. Плазменная безмазутная растопка пылеугольных котлов и подсветка факела / М.Ф. Жуков [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1995. – 304 с.
75. Карпенко, Е.И. Плазменно-энергетические технологии топливоиспользования / Е.И. Карпенко, В.Е. Мессерле. – Новосибирск: Наука, Сиб. предприятие РАН, 1988. – 320 с.
76. Карпенко, Е.И. Плазменно-энергетические технологии использования угля для эффективного замещения мазута и природного газа в топливном балансе ТЭС / Е.И. Карпенко, В.Е. Мессерле, Н.М. Коногоров // Теплоэнергетика. – 2004. – № 10. – С. 53-60.
77. Карпенко, Е.И. Плазменно-энергетические технологии топливоиспользования / Е.И. Карпенко, В.Е. Мессерле. – Новосибирск: Наука, Сиб. предприятие РАН, 1998. – 385 с.
78. Карпенко, Е.И. Введение в плазменно-энергетические технологии использования твердых топлив / Е.И. Карпенко, В.Е. Мессерле. – Новосибирск: Наука, 1997. – 118 с.

79. Утович, В.А. Исследование плазменного розжига и стабилизации горения пылеугольного факела / В.А. Утович, Н.Л. Новиков, В.С. Перегудов и др. // Теплоэнергетика. – 1990. – № 4. – С. 20-23.
80. Чернявский, Н.В. Основные направления повышения эффективности топливоиспользования на ТЭС Украины / Н.В. Чернявский, А.Ю. Провалов, А.В. Косячков // Современная наука: Сб. научн. статей. – 2012. – № 3(11). – С. 114-121.
81. Чернявский, Н.В. Оценка нижнего предела мехнедожога при пылевидном сжигании украинских энергетических углей / Н.В. Чернявский, И.Л. Голенко, А.Ю. Провалов // Современная наука: Сб. научн. статей. – НПВК «Триакон». – 2011. – №3(8). – С. 68-73.
82. Росляков, П.В. Эффективное сжигание топлив с контролируемым химическим недожогом / П.В. Росляков, И.Л. Ионкин, К.А. Плешанов // Теплоэнергетика. – 2009. – №1. – С. 20-23.
83. Росляков, П.В. Внедрение сжигания топлива с контролируемым химическим недожогом / П.В. Росляков, К.А. Плешанов // Новое в российской электроэнергетике. – 2010. – №1. – С. 12-30.
84. Росляков, П.В. Оптимальные условия для сжигания топлива с контролируемым химическим недожогом / П.В. Росляков, К.А. Плешанов, И.Л. Ионкин // Теплоэнергетика. – 2010. – №4. – С. 17-22.
85. Росляков, П.В. Нестехиометрическое сжигание природного газа и мазута на тепловых электростанциях / П.В. Росляков, И.А. Закиров. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 144 с.
86. Roslyakov, P.V. Fuel combustion with monitored moderate under burning / К.А. Pleshanov, I.L. Ionkin // Annals of DAAAM 2011 & Proceedings of the 22nd Int. DAAAM Symposium. – Vienna, Austria: DAAAM Int. – 2011. – Vol.22, – N.1. – P. 1153-1154.
87. Росляков, П.В. Методы защиты окружающей среды / П.В. Росляков. – М.: Издательство МЭИ, 2007. – 336 с.

88. Росляков, П.В. Нестехиометрическое сжигание природного газа и мазута на тепловых электростанциях / П.В. Росляков, И.А. Закиров. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 144 с.
89. Росляков, П.В. Контроль вредных выбросов ТЭС в атмосферу / П.В. Росляков, И.Л. Ионкин, И.А. Закиров и др. – М.:МЭИ, 2002. – 84 с.
90. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования: ГОСТ Р 50831-95. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996.
91. Росляков, П.В. Оптимальные условия для сжигания топлива с контролируемым химическим недожогом / П.В. Росляков, К.А. Плешанов, И.Л. Ионкин // Теплоэнергетика. – 2010. – №4. С. 17-22.
92. Бирюков, А.Б. Сжигание и термическая переработка органических топлив / А.Б. Бирюков, И.П. Дробышевская, Ю.В. Рубан. – Донецк: Ноулидж, 2014. – 232 с.
93. Ginkul, S.I. Heat and mass transfer: Workbook for students of institutes and universities / S.I. Ginkul, V.V. Kravtsov, V.I. Sheludchenko, A.V. Birukov. – Donetsk: Nord-Press, 2006. – 291 p.
94. ГОСТ 4790-80. Топливо твердое. Метод фракционного анализа. Изд-во стандартов. М., 1981.
95. ГОСТ 3306-88. Сетки с квадратными ячейками из стальной рифленой проволоки. Технические условия. Изд-во стандартов. М., 1989.
96. ГОСТ 3826-82. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия. Изд-во стандартов. М., 1983.
97. ГОСТ 147-95. Топливо твердое. Метод определения высшей теплоты сгорания и вычисления низшей теплоты сгорания. Изд-во стандартов. М., 1996.
98. ГОСТ 11022-95. Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности. Изд-во стандартов. М., 1996.
99. ГОСТ 27314-91. Угли бурые, каменное, антрацит и горючие сланцы. Ускоренный метод определения влаги. Изд-во стандартов. М., 1992.

100. ГОСТ 8606-93. Топливо твердое. Методы определения серы. Изд-во стандартов. М., 1993.
101. ГОСТ 6382-80. Угли бурые, каменные, антрацит и сланцы горючие. Метод определения выхода летучих веществ. Изд-во стандартов. М., 1981.
102. Бирюков, А.Б. Математическая модель выгорания пылеугольного топлива в топке энергетического котла / А.Б. Бирюков, В.А. Семергей // Вестник ДонНТУ. – 2017. – №1. – С. 32-37.
103. Ranade, V. V. Computational Modeling of Pulverized Coal Fired Boilers / V. V. Ranade, D. F. Gupta. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 271 p.
104. Díez, L. I. Modelling of pulverized coal boilers: review and validation of online simulation techniques / L. I. Díez, C. Cortés, A. Campo // Applied Thermal Engineering. – 2005. – Vol. 25, Iss. 10. – P. 1516-1533.
105. Ткаченко, В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В.Н. Ткаченко // Т.13. – Сер. «Задачи и методы: математика, механика, кибернетика». – Киев: Наукова думка, 2008. – 243 с.
106. Stuart, W. Churchill The accuracy and parametric sensitivity of algebraic models for turbulent flow and convection / W. Churchill Stuart, Bo Yu, Yasuo Kawaguchi // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2005. – Vol. 48, Iss. 25–26, D. – P. 5488–5503.
107. Modliński, Norbert, J. Computational modelling of a tangentially fired boiler with deposit formation phenomena / Norbert J. Modliński // Chemical and Process Engineering. – 2014. – № 35(3). – P. 361–368.
108. Enkhjargal, Kh. Mathematical modeling of the heat treatment and combustion of a coal particle. Volatile escape stage / Kh. Enkhjargal, V.V. Salomatov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2011. – Vol. 84, Iss. 3. – P. 638–647.
109. Trinchenko, A. Numerical research of reburning-process of burning of coaldust torch / A. Trinchenko, A. Paramonov, M. Kadyrov, A. Koryabkin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences. – 2017. – Vol. 90. – P. 1-9.

110. Dubrovskiy, V. Development of energy efficient technologies for burning coal in modern thermal power plants and efficiency assessment tools / V. Dubrovskiy, M. Zubova, N. Sedelnikov, A. Dihnova // EPJ Web of Conferences. Thermophysical Basis of Energy Technologies. – 2015. – P. 1-3.
111. Методы определения содержания влаги в аналитической пробе: ГОСТ Р 52917-2008.
112. Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ: ГОСТ Р 55660-2013.
113. Бирюков, А.Б. Сжигание и термическая переработка органических топлив. Твердое топливо: учеб. пособ. для вузов / А.Б. Бирюков, И.П. Дробышевская, Ю.Е. Рубан. – ГВУЗ «ДонНТУ». Донецк: Изд-во «Ноулидж». Донецкое отд-ние, 2014. – 232 с.
114. Усмонов, Н. О. Особенности использования парогазовых установок на ТЭС / Н. О. Усмонов, Ф. Ш. Умарджанова // Молодой ученый. – 2016. – №11. – С. 518-522.
115. Афанасьев, В.В. Анализ технологий газификации твердого топлива / В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.А. Тарасов // Вестник Чувашского университета. – 2010. – №3. – С. 194-205.
116. Козлов, А.Н. Исследование реакционной способности твердых топлив в зависимости от состава и их свойств / А.Н. Козлов, Д.А. Свищев, И.Г. Донской // В сборнике: Горение топлива: теория, эксперимент, приложения Материалы IX Всероссийской конференции с международным участием. 2015. – С 115-118.
117. Романов Р.А. Надежность энергетического оборудования и методы термографии / Р.А. Романов // Химическая технология. – 2012. – №1. –с. 28-35.
118. Частухин, В.И. Тепловой расчет промышленных парогенераторов / Под редакцией В.И. Частухина. – К.: Вища школа, 1980. – 182 с.
119. Бирюков, А.Б. Исследование параметрической чувствительности математической модели выгорания полифракционного факела / А.Б. Бирюков, В.А. Семергей // Вестник ДонНТУ. – 2017. – №2 (8). – С. 51-56.

120. Охрана природы. Атмосфера. Требования к точности контроля промышленных выбросов: РД 52.04.59-85.
121. Павленко, В. А. Газоанализаторы / В. А. Павленко. – М.-Л., 1965. – 296 с.
122. Соколов, В. А. Методы анализа газов / В. А. Соколов. – М., 1958. – 374 с.
123. Тепловой расчет котельных агрегатов: Нормативный метод. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
124. Резников М. И. Паровые котлы тепловых электростанций / М. И. Резников, Ю. М. Липов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 238 с.
125. Хзмалян Д, Я. Теория горения и топочные устройства / Д, Я. Хзмалян, Я. Н. Каган. – М.: Энергия, 1976. – 484 с.

Приложение А

Простейшие аналитические зависимости для определения времени выгорания сферической углеродной частицы

Время выгорания углеродной (сферической) частицы. Время выгорания углеродной частицы в факеле, согласно экспериментальным данным, зависит от того, на какую величину ΔT [34] ее температура превышает среднее значение температуры газового потока. Эта величина определяется при помощи следующей эмпирической зависимости:

$$\Delta T = 0,206 \cdot (1900 - T_r)^{0,74} \cdot \delta^{-0,16} \cdot C_{O_2}, \quad (A. 1)$$

где T_r – температура газового потока, К;

C_{O_2} – концентрация кислорода, %;

δ – текущий размер частицы, м.

Схема протекания процессов в приведенной пленке и область, в которой происходит реагирование (кинетическая или диффузионная), определяют время выгорания частицы.

Далее приведены зависимости для определения времени выгорания углеродной частицы по схеме с негорящим пограничным слоем.

Время сгорания сферической углеродной частицы в кинетической области имеет линейную зависимость от начального размера частицы:

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot M_C} \frac{\rho_{\text{ч}} \cdot R \cdot T^2}{k \cdot P_{1\Delta}} \cdot (\delta_0 - \delta_k), \quad (A. 2)$$

где M_C – молярная масса углерода, кг/кмоль;

T – температура частицы, К;

k – итоговая константа скорости реакций взаимодействия углерода с кислородом, соответствующая температуре частицы, м/с;

$\rho_{\text{ч}}$ – плотность углеродной частицы, кг/м³;

$P_{1\Delta}$ – парциальное давление кислорода на границе приведенной пленки, Па;

δ_0, δ_k – начальный размер частицы и размер выгорания, до которого исследуется, м.

Время сгорания сферической углеродной частицы в диффузионной области имеет квадратичную зависимость от начального размера частицы:

$$\tau = \frac{1}{4 \cdot M_C} \frac{\rho_{\text{ч}} \cdot R \cdot T^2}{\text{Nu}_D \cdot D \cdot P_{1\Delta}} \cdot (\delta_0^2 - \delta_k^2). \quad (\text{A. 3})$$

Приложение Б

Подмодель термохимических превращений твердого топлива

$$\frac{dH_2O_o^h}{d\tau} = -k_{H_2O_o^h} H_2O_o^h; \quad (\text{Б. 1})$$

$$\frac{dV_{vol}}{d\tau} = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} k_{V_{O_{i,j}}} V_{O_{i,j}} - k_{V_{vol}} v_{V_{vol}} \prod_{a=1}^{n_a} S_a^{v_{S_a}}; \quad (\text{Б. 2})$$

$$\frac{dV_O}{d\tau} = - \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} k_{V_{O_{i,j}}} V_{O_{i,j}}; \quad (\text{Б. 3})$$

$$\frac{dC}{d\tau} = - \left[k_C v_C \prod_{b=1}^{n_b} S_b^{v_{S_b}} + \sum_{r=1}^{n_r} k_{C,r} v_{C,r} \prod_{l=1}^{n_l} S_l^{v_{S_{l,r}}} \right]; \quad (\text{Б. 4})$$

$$\frac{dO_2}{d\tau} = - \left[k_{V_{vol}} v_{O_2} \prod_{a=1}^{n_a} S_a^{v_{S_a}} + k_C v_{O_2} \prod_{b=1}^{n_b} S_b^{v_{S_b}} + k_{P_g} v_{O_2} \prod_{z=1}^{n_z} S_z^{v_{S_z}} \right]; \quad (\text{Б. 5})$$

$$\begin{aligned} \frac{dP}{d\tau} = & k_{i_2 \hat{I}_O^k} H_2O_o^h + \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} k_{V_{O_{i,j}}} V_{O_{i,j}} + k_{V_{vol}} v_{P_{V_{vol}}} \varphi_{V_{vol}} \prod_{a=1}^{n_a} S_a^{v_{S_a}} + k_C v_{P_C} \varphi_C \prod_{b=1}^{n_b} S_b^{v_{S_b}} \\ & + \sum_{r=1}^{n_r} k_{C,r} v_{P_{g,r}} \varphi_{C,r} \prod_{l=1}^{n_l} S_l^{v_{S_{l,r}}} + k_{P_g} v_{P_{P_g}} \varphi_{P_g} \prod_{z=1}^{n_z} S_z^{v_{S_z}} - \sum_{r=1}^{n_r} k_{C,r} v_{P,r} \prod_{l=1}^{n_l} S_l^{v_{S_{l,r}}} \\ & - k_{P_g} v_{P_{P_g}} \prod_{z=1}^{n_z} S_z^{v_{S_z}}; \end{aligned} \quad (\text{Б. 6})$$

где $H_2O_o^h, V_o$ – исходная концентрация: влажность топлива и летучих веществ, кг/кг;

$H_2O^h, V_B = V_{bal} + V_{vol}$ – количество веществ, вышедших из топлива в газовый объем: испаренной влаги и летучих веществ (балластных - V_{bal} и горючих V_{vol}), кг/кг;

O_2 – концентрация кислорода, кг/кг;

C – концентрация углерода в топливе, кг/кг;

$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT(\tau)}\right)$ – константа скорости реакции 1/с (м/с);

τ – продолжительность процесса, с;

ν – стехиометрический коэффициент;

$i = 1 \dots n_i$, $j = 1 \dots n_j$, $a = 1 \dots n_a$, $b = 1 \dots n_b$, $l = 1 \dots n_l$, $z = 1 \dots n_z$ – количество реагирующих компонентов соответствующих химических реакций;

$r = 1 \dots n_r$ – число групп реакций, которое зависит от количества компонентов, вступающих в реакцию с углеродом;

P – концентрация продуктов: термического разложения топлива испаренной влаги, выделившихся и несгоревших летучих веществ, полного и неполного горения коксового остатка, кг/кг;

φ_x – коэффициент, учитывающий мольную долю компонента x в газовой фазе.

Начальные условия для полученной системы следующие: $H_2O_0^h = H_2O_{0\text{исх}}^h$,

$$V_0 = V_{0\text{исх}}, C = C_{\text{исх}}, O_2 = O_{2\text{исх}}, H_2O^h = 0, V = 0, P = 0.$$

Приложение В

Подмодель процесса горения и тепломассообмена пылеугольных частиц в
газовом потоке

$$\frac{dC}{d\tau} = -[C_R(\phi_{ve} + \phi_{vf}) + C_{2R}(\phi_{vg} + \phi_{vh})] \frac{273F_C}{T_g p_C V_C}; \quad (B.1)$$

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{12dC\delta_o}{32d\tau C_o}; \quad (B.2)$$

$$\frac{da_i}{d\tau} = \phi_s; \quad (B.3)$$

$$\frac{dP_m}{d\tau} = [C_R\phi_{ye} + C_{2R}(\phi_{yg} + \phi_{yh} - \phi_{\beta g})] \frac{273F_C}{T_g p_C V_C} + \phi_{yn} + \phi_{vl} - \phi_{vn}; \quad (B.4)$$

$$\frac{dP_u}{d\tau} = \phi_a + \phi_{yd} + (C_R\phi_{yf} - C_{2R}\phi_{\beta h}) \frac{273F_C}{T_g p_C V_C} + \phi_{xn} + \phi_{yl} - \phi_{\beta n}; \quad (B.5)$$

$$\frac{dO_2}{d\tau} = - \left[\phi_{\beta d} + (\phi_{\beta e} + \phi_{\beta f}) \frac{C_R 273F_C}{T_g p_C V_C} + \phi_{\beta l} \right]; \quad (B.6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{dT_C}{d\tau} \\ &= \left\{ - (r + c_{ws}T_C)\gamma_{ws}\phi_a - (Q_{vol} + c_{vol}T_C)\gamma_{vol}\phi_b \right. \\ &+ [c_R(\phi_{ve} + \phi_{vf})Q_C - c_{2R}(\phi_{vg} + \phi_{vh})Q_C] \frac{273F_C}{T_g V_C} - Nu \frac{\lambda_g}{\delta} (T_C - T_g) \frac{F_C}{V_C} \\ &- \sigma_o \varepsilon_C \varphi_C (T_C^4 - T_{burn}^4) \frac{F_C}{V_C} - \sum_{i=1}^n \lambda_{im} A_i^d (c_{im}T_C + Q_{tm}^i) \phi_s \\ &- [c_R(\phi_{\beta e} + \phi_{\beta f}) - c_{2R}(\phi_{\beta g} + \phi_{\beta h})] \frac{273c_g F_C}{T_g p_g V_C} (T_C \\ &\left. - T_g) \right\} \frac{6}{c_C p_C}; \quad (B.7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{dT_g}{d\tau} \\
&= \frac{1}{c_g} \left\{ - \frac{\Phi_a c_{ws} V_C \gamma_{ws} T_g}{V_g} \gamma_{ws} \Phi_a + \Phi_{vd} Q_{com} \frac{1 - W^r - A^r}{aV^o + V_{H_2O}} + \Phi_{vl} p_g Q_m - \Phi_{vn} p_g Q_p \right. \\
&+ \left[\left(c_R (\Phi_{ve} + \Phi_{vf}) + c_{2R} (\Phi_{vg} + \Phi_{vh}) \right) \frac{6c_g 273 K^r F_C}{p_g p_C T_g V_g} + \Phi_b \frac{c_g}{p_g} (1 - W^r - A^r) \right. \\
&+ \left. \left. \frac{6Nu\lambda_g K^r F_C}{p_C V_g \left(\frac{V_C}{F_C} \right)} \right] \frac{(T_C - T_g)}{(aV^o + V_{H_2O})} \right. \\
&- \sigma_o a_{ct} (S/V)_t (T_g^4 \\
&- T_{burn}^4) \frac{T_g}{273} \left. \right\}, \tag{B.8}
\end{aligned}$$

где c_R и c_{2R} – концентрации кислорода и продуктов термохимического превращения на поверхности частиц, зависящие от констант реакций горения углерода и коэффициента диффузии, выраженные в кг $O_2 / м^3$;

δ_0 – начальный диаметр частицы, м;

A_i^d – доля i -го минерального компонента относительно общей зольности угля;

$d\alpha_i$ – доля прореагировавшего i -го минерального компонента, кг/кг топлива;

ν , β , γ и χ – стехиометрические коэффициенты;

$Z_{i, j, r, s, m}$ – количество учитываемых компонентов соответствующих химических реакций;

$Z_{j, jd}$ – количество индивидуальных стадий, ответственных за выделение i -го компонента из топлива и i_d -го продукта деструкции смол;

Z_y – число групп реакций взаимодействия продуктов неполного (P_m) и полного (P_u) горения топлива;

Q – тепловые эффекты соответствующих химических реакций, Дж/(кг O_2);

n – количество учитываемых минеральных компонентов;

T_C – температура частицы, К;

\dot{O}_g – температура газов, К;

\dot{O}_{burn} – температура облучающей среды, К.

Приложение Г

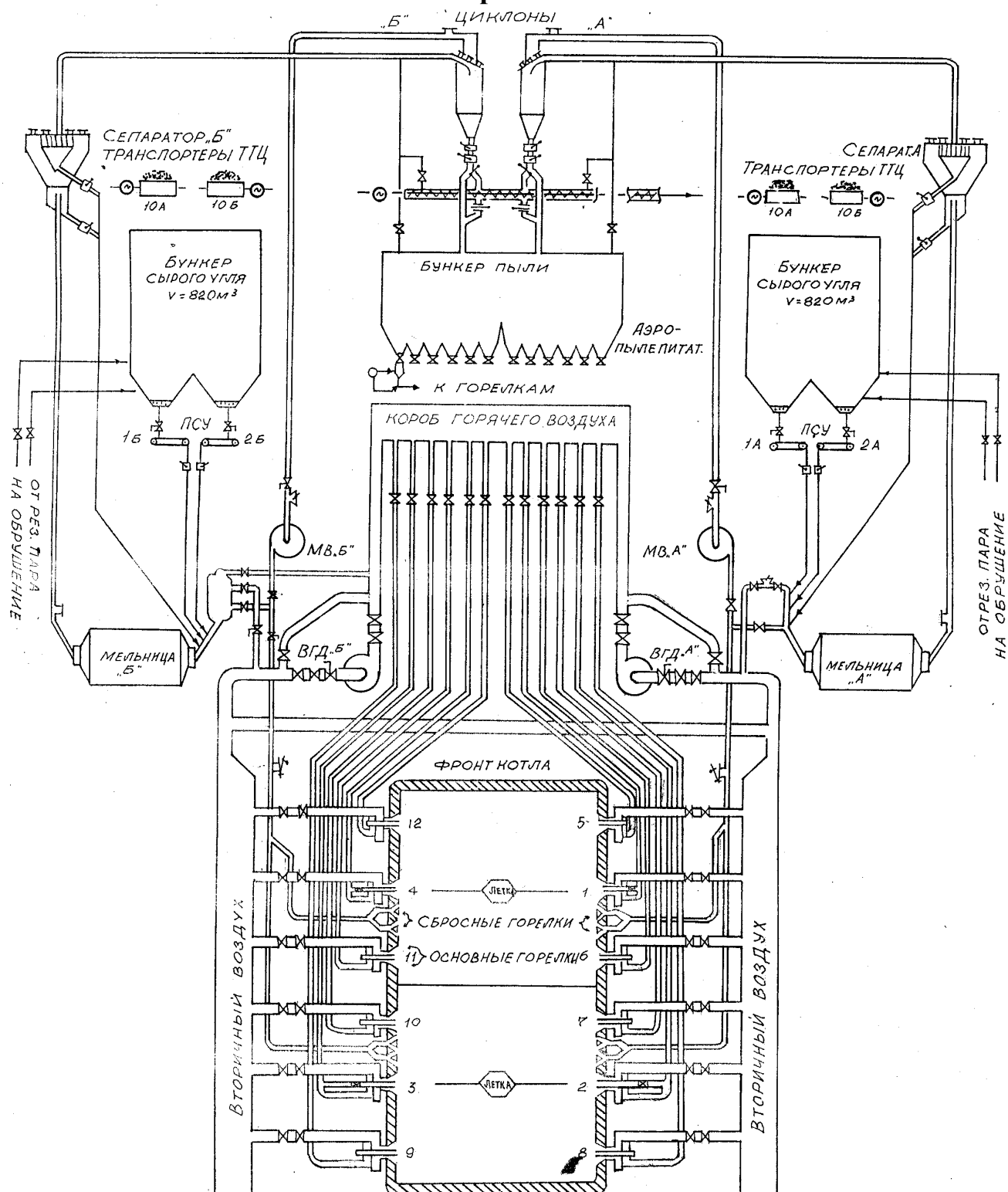


Рис. Г.1. Принципиальная схема пылесистемы замкнутого типа.

Приложение Д

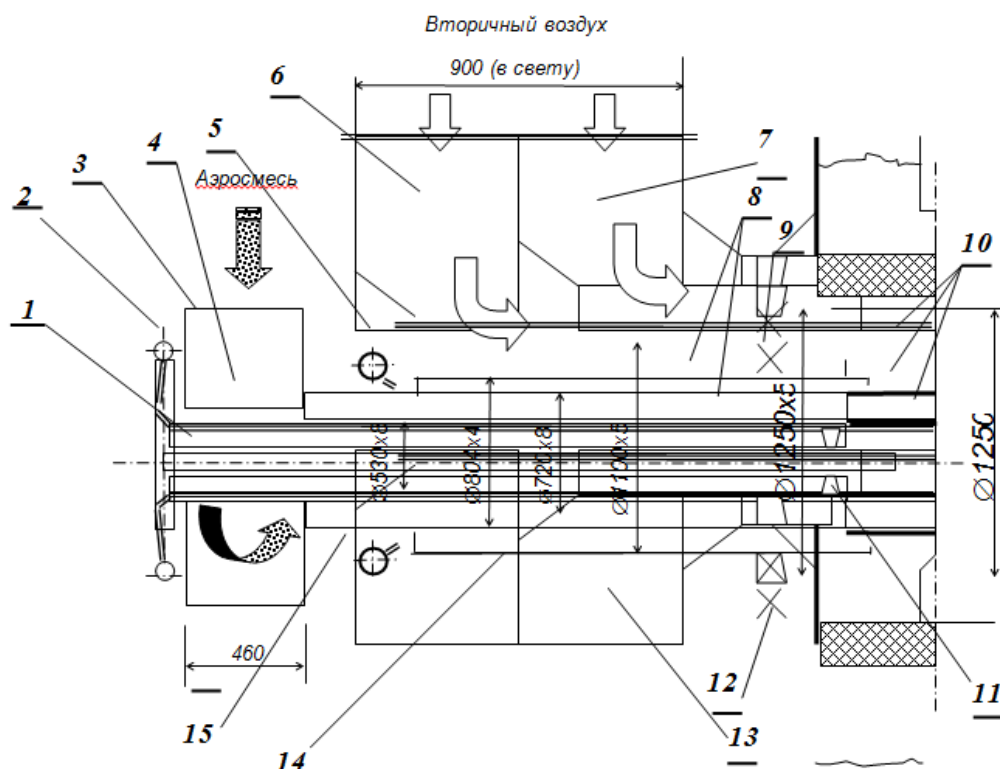


Рис. Д.1. Эскиз улиточно-лопаточной горелки котла ТП-100:

- 1 – труба для установки мазутной форсунки $\text{Ø}159 \times 4,5 \text{ мм}$;
- 2 – коллектор дополнительной подачи природного газа;
- 3 – улитка первичного воздуха;
- 4 – центральная труба $\text{Ø}530 \times 8 \text{ мм}$;
- 5 – коллектор основной подачи природного газа;
- 6 – подвод вторичного воздуха во внутренний канал;
- 7 – подвод вторичного воздуха в периферийный канал;
- 8 – газоподающие трубы $\text{Ø}32 \times 4 \text{ мм}$;
- 9 – лопатки с плавным входом аксиального завихрителя внутреннего канала;
- 10 – жаропрочные насадки;
- 11 – аксиальный завихритель с прямыми лопатками в центральном канале;
- 12 – лопатки с плавным входом аксиального завихрителя периферийного канала;
- 13 – промежуточная труба вторичного воздуха $\text{Ø}1100 \times 5 \text{ мм}$;
- 14 – кожух газоподающих труб $\text{Ø}804 \times 5 \text{ мм}$;
- 15 – труба первичного воздуха $\text{Ø}720 \times 8 \text{ мм}$.

Приложение Е

ТРУБКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ в гидроаэромеханике – устройства для измерения величины и направления скорости, а также расхода жидкости или газа, основанные на определении давления в потоке. Применяются для измерения скоростей течения водных и воздушных потоков, а также относительных скоростей движения судов и самолётов.

Широко распространена комбинированная трубка Пито – Прандтля, представляющая собой цилиндрическую трубку с полусферическим носиком l_m (рис. 1), ось которой устанавливается вдоль потока. Через центральное отверстие на полусфере измеряется полное давление p_0 , которое реализуется при изобарическом торможении потока до нулевой скорости. Другое отверстие (или ряд отверстий) l располагается на боковой поверхности трубки и служит для измерения статического давления p . Геометрическая форма трубок измерительных, форма отверстий и расстояние от них до носика трубки выбираются так, чтобы давление в боковых отверстиях по возможности мало отличалось от статического давления в исследуемой точке потока. Небольшое несоответствие давлений учитывается поправочным коэффициентом χ который определяют калибровкой. Зная p и p_0 , вычисляют скорость потока u на основании Бернулли уравнения. Для несжимаемой жидкости $(u = \sqrt{2 \xi (p_0 - p) \rho})$ плотность ρ может быть найдена по Клапейрона уравнению или др. способом. При скоростях воздуха выше 50-60 м/с необходимо учитывать сжимаемость воздуха.

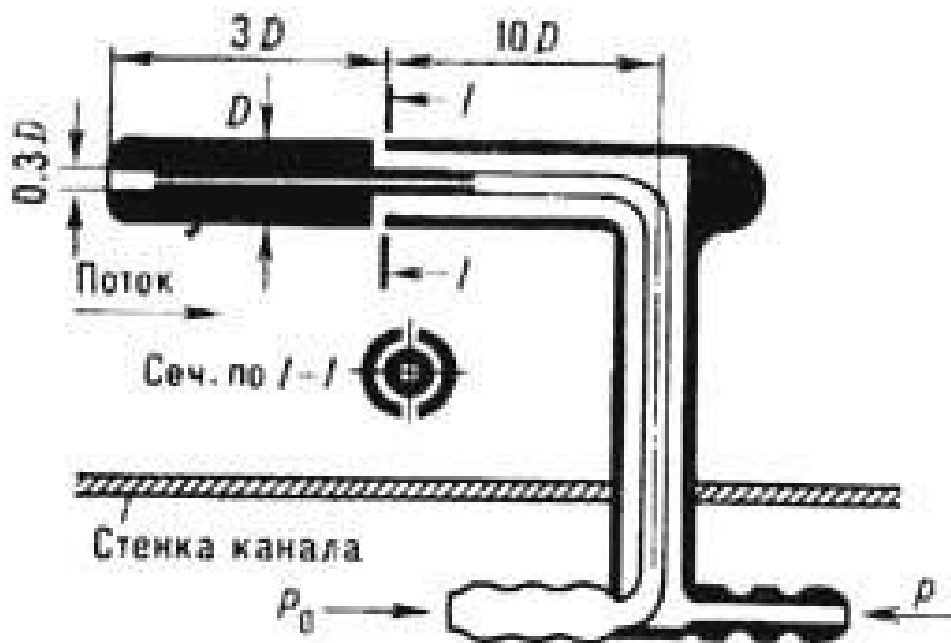


Рис. Е.1. Схема трубки Пито - Прандтля.

Трубка Пито - Прандтля применяется также для определения u и *Маха* числа M в сверхзвуковом потоке. В этом случае перед трубкой образуется ударная волна и измеряемое в центр. отверстии давление практически равно давлению торможения p'_0 за прямой ударной волной. При известном из др. измерений давлении изоэнтропического торможения p_0 по величине отношения p'_0/p_0 можно определить M в потоке перед трубкой. Важно отметить, что измеряемые при помощи трубки значения p_0 или p'_0 (соответственно при дозвуковой или сверхзвуковой скорости) практически не зависят от угла между вектором местной скорости и осью трубки, до тех пор пока этот угол меньше $15-20^\circ$, но значения статического давления p существенно зависят от этого угла даже при его небольшой величине.

При малых скоростях потока ($u < 6$ м/с) или при больших разрежениях, когда Рейнольдса число $Re < 300$, наблюдается значительное возрастание коэф. α . Трубка Пито - Прандтля используется и при очень малых Re , однако её практическое применение для этих течений связано с рядом трудностей.

Для измерения скорости потока существует множество модификаций трубки Пито - Прандтля (трубки Брабе, Лосиевского, Престона и др.); кроме того, скорость определяют Вентури трубкой. Направление потока измеряют цилиндрическими и сферическими насадками, комбинациями из трёх расположенных под углом друг к другу трубок Пито и т. д., показания которых очень чувствительны к направлению потока.

Приложение Ж

Акт внедрения результатов диссертационного исследования на Старобешевской ТЭС



Юридический адрес

ул. Станционная, д. 3, пгт. Новый Свет,
Старобешевский район, ДНР, 87230

Телефон

071 346 97 03

E-mail

dcl@sbtes.don.energy

Банковские реквизиты

Идентификационный код 51019826

р/с 40602810627010000002 (Российский рубль)

в Центральном Республиканском Банке ДНР

ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ «СТАРОБЕШЕВСКАЯ ТЕПЛОВАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ» РП «ЭНЕРГИЯ ДОНБАССА»

Исх. № _____ от _____

На № _____ от _____

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Семергея В.А. на тему «Совершенствование технологии сжигания пылеугольного топлива в топках энергетических котлов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика».

В течение периода с 2010 года по 2016 год на Старобешевской ТЭС были успешно реализованы следующие мероприятия:

1) Замена двухулиточных пылегазовых горелок, выполненных по проекту СКБ ВТИ, на улиточно-лопаточные двухканальные по вторичному воздуху, которые максимально соответствуют требованиям отраслевого стандарта ОСТ 108.030.26–78;

2) Изменение схемы подачи угольной пыли высокой концентрации путём переврезки ППВК в трубопроводы первичного воздуха к горелкам котла;

3) Замена обычных щелевых топок на газоплотные.

В результате было достигнуто сокращение удельного расхода топлива на выработку электроэнергии на 3 %.

Семергей В.А. участвовал в научно-техническом сопровождении всех названных мероприятий как сотрудник цеха наладки. В дальнейшем все эти направления совершенствования технологии сжигания пылеугольного топлива были детально изучены и систематизированы в диссертационной работе Семергея В.А., что создает перспективы дальнейшего улучшения показателей Старобешевской ТЭС и использования этих решения в условиях других угольных ТЭС.

Главный инженер



К. С. Гулов

Приложение 3

Акт внедрения результатов диссертационного исследования в учебный процесс



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

06.10.2020 № 30-12/185

На № _____ от _____

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Семергея В.А. на тему «Совершенствование технологии сжигания пылеугольного топлива в топках энергетических котлов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика».

Результаты, полученные при выполнении диссертационного исследования Семергея В.А., используются в учебном процессе кафедры технической теплофизики Донецкого национального технического университета при подготовке магистров по магистерской программе «Промышленная теплотехника» (направление подготовки 22.04.02 «Металлургия»), а именно:

– математическая модель, позволяющая исследовать выгорание полифракционного пылеугольного топлива в факеле с учетом массовой доли каждой из фракций и ее зольности, учитывающая общее потребление кислорода из газового потока на горение каждой из фракций, представляется студентам при изучении курса «Системы производства и распределения энергоносителей промышленных предприятий».

Первый проректор
ГОУВПО «ДОННТУ»,
канд. техн. наук, доцент, профессор



А.А. Каракозов

Начальник учебного отдела
ГОУВПО «ДОННТУ»,
канд. техн. наук, доцент, профессор

Б.В. Гавриленко

Заведующий кафедрой
«Техническая теплофизика»
ГОУВПО «ДОННТУ»,
д-р техн. наук, профессор, профессор

А.Б. Бирюков

Глава научно-методической комиссии
направления подготовки
ГОУВПО «ДОННТУ»,
д-р техн. наук, доцент, профессор

С.А. Снитко