

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк – 2020

Работа выполнена на кафедре технической теплофизики Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

- Научный руководитель: **Бирюков Алексей Борисович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк,
- Официальные оппоненты: **Дремов Владимир Владимирович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка,  
профессор кафедры физики, математики и материаловедения
- Андрийчук Николай Данилович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Государственное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет им. В. Даля», г. Луганск,  
директор Института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства
- Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (Российская Федерация)**

Защита состоится **23 декабря 2020 года в 13-00 часов** на заседании диссертационного совета Д 01.016.03 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет» по адресу: 283001, г. Донецк, проспект Театральный, 13, ауд. 264.

Тел. факс: +38(062) 302-06-00, e-mail: [d0101603-donnu@ya.ru](mailto:d0101603-donnu@ya.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, <http://science.donnu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 01.016.03  
доктор физико-математических наук, доцент

И.А. Моисеенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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, анаклаирида «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 высокозольных 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 топки 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 топки 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 требований 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы и сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет исследований, дана краткая характеристика использованных методов исследования, представлены научная новизна, положения выносимые на защиту, практическая значимость работы, обоснование достоверности результатов, личный вклад соискателя, даны сведения об апробации результатов исследования и публикациях по диссертации.

**В первом разделе** диссертации рассмотрены физико-химические основы сжигания ПУТ; типовые технологические приемы сжигания ПУТ и конструктивные параметры топков паровых энергетических котлов; способы расчета и моделирования процесса сжигания ПУТ; различные способы совершенствования технологии сжигания ПУТ в топках энергетических котлов за счет выбора рациональных технологических и конструктивных параметров. Показано, что в значительной мере эти результаты получены в работах Канторовича Б.В., Кнорре Г.Ф., Помернацева В.В., Вулиса Л.А., Ляховского Д.Н., Семенова Н.Н., Капицы П.Л., Палеева И.И. Среди современных решений рассмотрены результаты работ, проведенных в Институте теплофизики имени С.С. Кутателадзе, Московском энергетическом институте, Томском политехническом университете, Санкт-Петербургском государственном техническом университете.

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 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.

На основании выводов, сделанных в результате рассмотрения и анализа материалов, сформулированы цель и задачи исследования.

**Во втором разделе** детально описаны основные использованные для исследования методики. В соответствии с одной из задач исследования усовершенствована известная упрощенная математическая модель выгорания угольной частицы. Сущность усовершенствования заключается в том, что вместо одного обыкновенного дифференциального уравнения математическая формулировка модели представлена системой из  $n$  обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, где  $n$  – количество выделенных для рассмотрения фракций:

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

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

и начальными условиями

$$\delta_i(0) = \delta_i^{(0)} \quad (i = \overline{1, n}), \quad (2)$$

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;  $\rho_k$  – кажущаяся плотность угольной частицы без учета золы и летучих, кг/м<sup>3</sup>;  $M_c$  – 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, м<sup>2</sup>/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.;  $\tau$  – время;  $\tau_*$  – 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

$$O_2(\delta_1(\tau), \dots, \delta_n(\tau)) = 0,21 \cdot \frac{(\alpha - 1) \cdot V^{(0)} + G(\delta_1(\tau), \dots, \delta_n(\tau)) \cdot V_k^{(0)}}{V_r}, \quad (3)$$



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,  $\text{нм}^3/\text{кг}$ ;  $V_T$  – объем продуктов сгорания, образующихся при сгорании 1 кг угля,  $\text{нм}^3/\text{кг}$ ;  $V_k^{(0)} = 8,89$  – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг углерода,  $\text{нм}^3/\text{кг}$ ;  $\alpha$  – 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:

$$G(\delta_1(\tau), \dots, \delta_n(\tau)) = \frac{\rho_k \cdot (\pi/6) \cdot \sum_{i=1}^n (\chi_i \cdot \delta_i(\tau)^3)}{G_H}, \quad (4)$$

где  $G_H$  – начальное значение массы углерода в 1 кг исходного топлива, кг;  $\chi_i$  – число частиц топлива  $i$ -й фракции с размером  $\delta_i(\tau)$ , соответствующее 1 кг исходного топлива.

Предельное время пребывания частиц в топочном пространстве  $\tau_*$  определяется следующим выражением:

$$\tau_* = \frac{V_T}{B \cdot V_r} \cdot \frac{273}{T_\phi}, \quad (5)$$

где  $V_T$  – объем топки котла,  $\text{м}^3$ ;  $B$  – расход топлива на котел,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $T_\phi$  – средняя температура факела, К.

Решение системы позволяет отследить выгорание каждой из фракций ПУТ, учитывая при этом потребление кислорода на горение каждой фракции из общего газового объема. Именно такой подход позволяет получать реальные значения остаточного углерода (механического недожога) при сжигании полифракционного ПУТ.

В первом приближении для расчета использованы данные ситового анализа пыли от пробы, отобранной после мельницы из раздаточного бункера в условия энергоблока № 5 Старобешевской ТЭС. Для каждой из четырех выделенных для рассмотрения фракций размер частиц принят как среднее арифметическое минимального и максимального размеров согласно соответствующему классу крупности (Табл. 1).

Таблица 1

## Ситовый анализ пыли

№ 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

Полученные в результате кривые, описывающие изменение размера частиц каждой из фракций, представлены на рис. 1а. 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. 1б.

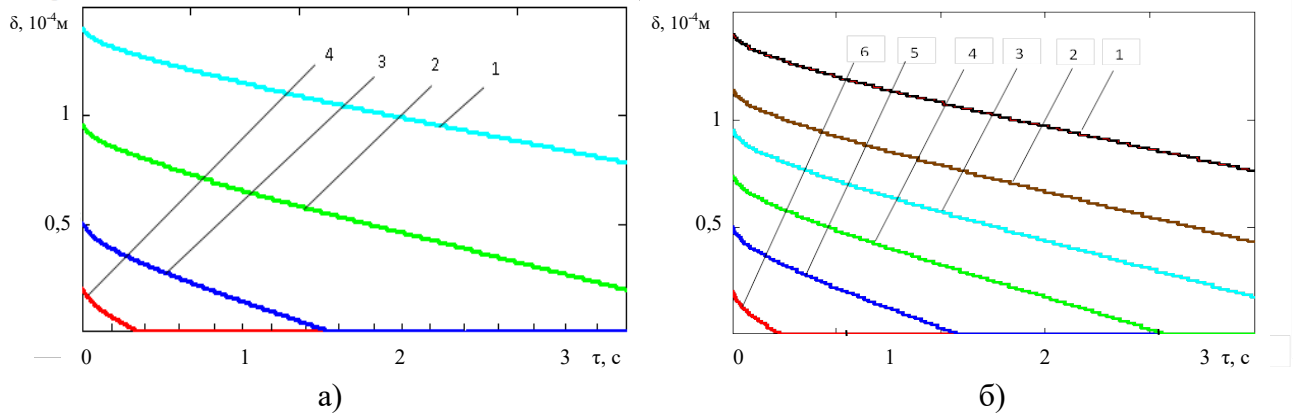


Рис. 1. Изменение размеров частиц выделенных для рассмотрения фракций в процессе сжигания ПУТ: а - для базового количества выделенных фракций, б - для увеличенного количества фракций.

Характер изменения остаточного содержания углерода во времени для второго численного эксперимента представлен на рис. 2.

Для обеспечения в дальнейшем необходимого уровня точности при задании количественных значений параметров модели проведен анализ чувствительности модели к точности задания следующих параметров: диффузионное число Нуссельта, коэффициент молекулярной диффузии, расчетная плотность частиц топлива, константа скорости реакции, температура продуктов сгорания.

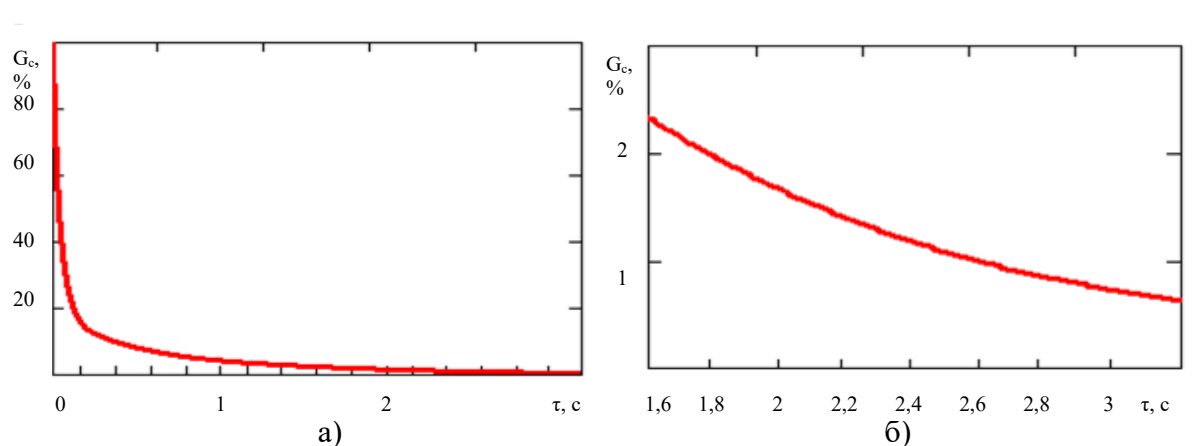


Рис. 2. Изменение содержания несгоревшего углерода в общей массе ПУТ: а) – для полного периода времени нахождения топлива в топке, б) – для завершающего этапа нахождения топлива в топке.

Базовые значения исследуемых параметров 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  $T = 1800 \text{ К}$ . Сущность исследования заключается в имитации погрешность в задании каждого из параметров по отдельности и сравнении результатов моделирования при базовом и содержащем погрешность значениях параметра.

В результате установлено, что значительное влияние на результаты моделирование 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 вместо задания среднего значения температуры факела 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.

Также в данном разделе приведены методики экспериментального определения выхода летучих, влагосодержания в пробах ПУТ и остаточного углерода в пробах золы.

**Определение зольности на рабочую массу твердого топлива.** Отбор и разделка пробы твёрдого топлива (угольной пыли) производится с целью определения в ней содержания зольности на рабочую массу, величина которой характеризует наличие негорючих веществ в твёрдом топливе.

Отбор пробы угольной пыли выполняется по ГОСТ 10742, производится из пробоотборника каждого циклона пылесистемы энергоблока специальным пробоотборным устройством в количестве 200 – 300 грамм.

Проба угольной пыли подвергают разделке по ГОСТ 23083, которая включает в себя сокращение пробы до веса 80 – 100 грамм с помощью шахматного порционера и рассеивания сокращенной пробы через сито 200 мкм. В случае необходимости пробы измельчаются в ступке до полного прохождения через сито.

Методика определения зольности твердого топлива на рабочую массу определяется согласно ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-81).

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 °С. Затем температуру в муфельной печи повышают до 850 ± 10 °С, 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:

$$C = 100 - \frac{(a_1 - a_2)}{v} \cdot 100; \quad (6)$$

где  $a_1$  - вес навески с тарой до прокаливания, г ;  $a_2$  - вес навески с тарой после прокаливания, г;  $v$  - величина навески.

#### **Метод определения выхода летучих веществ в твёрдом топливе.**

Определение летучих веществ в твердом топливе определяется по ГОСТ 6382-91 (ИСО 562-81) Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода летучих веществ.

Выход летучих веществ определяют, как потерю массы навески твердого топлива за вычетом влаги при нагревании без доступа воздуха в стандартных условиях.

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.

В муфельной печи устанавливают температуру (900 ± 5) °С с помощью постоянно установленной зачехленной термопары. В зону постоянной температуры печи помещают подставку, заполненную пустыми тиглями с крышками. Проверяют температуру под каждым тиглем на одной и той же высоте с помощью незачехленной термопары. Найденные значения должны находиться в пределах допустимых отклонений от температуры рабочей зоны.

**Определение влаги на рабочую массу твердого топлива.** Определение влаги аналитической пробы производится по ГОСТ 27314, ГОСТ 11014, ГОСТ 27589. Отбор и подготовка проб производится согласно ГОСТ 10742 и ГОСТ 23083.

Сущность метода заключается в высушивании навески аналитической пробы топлива с максимальным размером зерен 0,2 мм в сушильном шкафу при температуре (160±5) °С и вычислении массовой доли влаги по потере массы.

Из аналитической пробы топлива во взвешенные бюксы отбирают навески топлива массой (1±0,1) г с точностью не менее 0,0002 г. Открытые бюксы с навесками помещают в сушильный шкаф, предварительно нагретый до температуры (160±5) °С, и при этой температуре сушат не менее 5 мин.

После окончания сушки бюксы вынимают из сушильного шкафа, закрывают крышками и охлаждают 5 мин на металлической подставке, затем в

эксикаторе до комнатной температуры, после чего взвешивают. Контрольные просушивания не проводят.

Массовую долю общей влаги, определяемую одноступенчатым методом, массовую долю внешней влаги, влаги воздушно-сухого топлива и влаги аналитической пробы, %, вычисляют по формуле:

$$W = \frac{m_1}{m} 100; \quad (7)$$

где  $m_1$  - потеря массы при сушке навески топлива, г;  $m$  - масса навески пробы топлива, г.

Массовую долю общей влаги, определяемую двухступенчатым методом, %, вычисляют по формуле:

$$W_t = W_{\text{вх}} + W_h \cdot \frac{100 - W_{\text{вх}}}{100}; \quad (8)$$

где  $W_{\text{вх}}$  - внешняя влага топлива, %;  $W_h$  - влага воздушно-сухого топлива, %.

Результаты вычисляют с точностью до 0,1%.

**В третьем разделе** разрабатывается способ определения времени задержки воспламенения ПУТ и адаптации математической модели к конкретным условиям. 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.

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

Таким образом, при прочих равных условиях величина механического недожога может быть снижена за счет уменьшения времени задержки воспламенения  $\Delta\tau_3$ .

В условиях электростанции потеря тепла с механическим недожогом ( $q_4$ ) определяется как:

$$q_4 = a_{\text{ун}} \cdot \frac{C_{\Gamma}^{\text{yH}}}{100 - C_{\Gamma}^{\text{yH}}} \cdot \frac{7800 \cdot A^r}{Q_{\text{H}}^p}; \quad (9)$$

где  $a_{\text{ун}}$  – доля золы топлива в уносе, равная 0,85;  $c_i^{\text{ун}}$  – содержание горючих компонентов в уносе, %;  $A'$  – зольность топлива, отнесенная к рабочей массе, %;  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  – низшая теплота сгорания твердого топлива, ккал/кг.

Способ определения времени задержки воспламенения и адаптации математической модели основан на использовании следующего алгоритма. При помощи этой модели для реально используемого уровня средней температуры газов в топке моделируется процесс выгорания топлива для промежутка времени от 0 до  $\tau_{\text{ср}}$ , определенного при помощи модели идеального вытеснения.

При помощи математической модели выгорания полифракционного ПУТ для набора исходных данных, соответствующих параметрам проведения испытания, получаем зависимость доли несгоревшего углерода от времени. Пересчет доли несгоревшего углерода на расчетную величину механического недожога осуществляется по формуле:

$$q_4 = G_c \cdot \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{7830}; \quad (10)$$

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. Далее от значения  $q_4$ , полученного в результате анализа золы уноса, проводится горизонтальная линия до пересечения с модельной кривой. 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  $\tau_{\text{ср}}$ , то это указывает на неправильно заданный температурный уровень протекания процесса.

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

$$\tau_{\text{гор}} = \tau_{\text{ср}} - \Delta\tau_3; \quad (11)$$

На основании работы со значениями  $q_4$  до реконструкции и после реконструкции определяем время горения коксового остатка в обоих случаях. При одинаковом полном времени пребывания частиц в топке 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 коксового остатка:

$$\Delta\tau_3^{\text{посл.р}} < \Delta\tau_3^{\text{до.р}}; \tau_{\text{гор}}^{\text{посл.р}} > \tau_{\text{гор}}^{\text{до.р}}; \quad (12)$$

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

Уровень механического недожога был установлен в результате анализа золы уноса до и после реконструкции (Табл. 2).

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 %.

Таблица 2  
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

Пример графического определения реального времени горения коксового остатка для блока № 9 по предложенной схеме представлен на рис. 3. Количественные результаты определения  $\tau_{гор}$  и  $\Delta\tau_3$  для трех энергоблоков представлены в табл. 3.

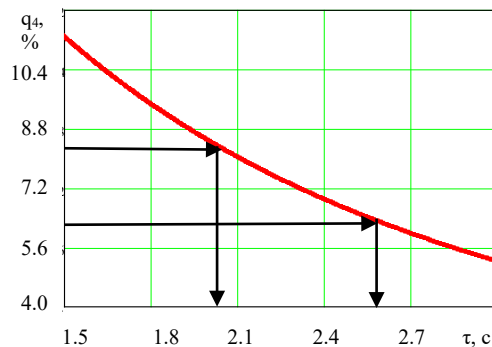


Рис. 3. Графическое определение реального времени горения коксового остатка для блока № 9 по предложенной схеме.

Таблица 3  
Установленные значения времени горения частиц и времени задержки  
воспламенения до и после реконструкции

№ блока	$\tau_{гор}^{до.р}$ , с	$\tau_{гор}^{после.р}$ , с	$\Delta\tau_3^{до.р}$ , с	$\Delta\tau_3^{после.р}$ , с	$\Delta\tau_3^{до.р} - \Delta\tau_3^{после.р}$ , 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

В четвертом разделе исследуется влияние обеспечения предварительного контакте ПУТ с горячим воздухом на глубину выгорания топлива. Для обеспечения названного теплового контакта в условиях котлов ТП-100 Старобешевской ТЭС производилась переврезка пылепроводов высокой концентрации (ППВК) (рис. 4).

Для проведения исследования был выполнен отбор контрольных проб угольной пыли в различных местах. Основной отбор пробы брался из-под бункера готовой пыли, где горячий воздух не взаимодействует с угольной пылью и не оказывает своего влияния. Четыре отбора угольной пыли отбирались непосредственно перед горелками из воздухопровода первичного воздуха, в котором первоначально угольная пыль смешивалась с горячим воздухом, подаваемым на первичную улитку основной горелки котла.

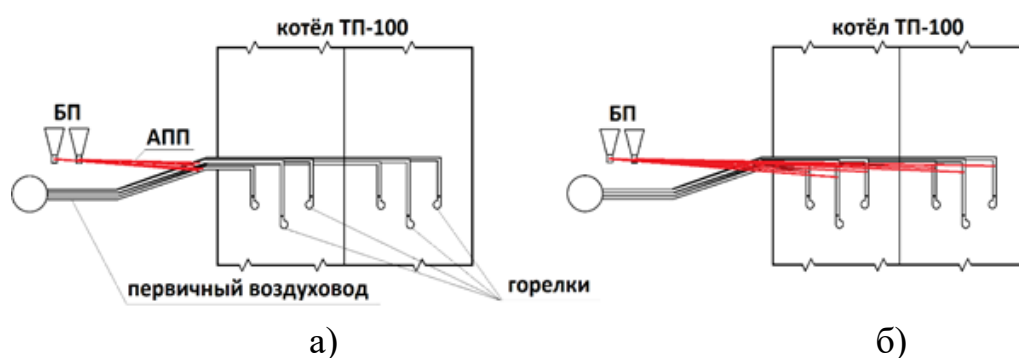


Рис. 4. Схема трассировки азрационного пылепитателя к воздуховодам первичного воздуха после реконструкции (а) и до реконструкции (б).

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.

Для отобранных проб определялось количество общей влаги и содержание летучих. Значения параметров, характеризующих каждую горелку, и результаты экспериментов по определению содержания летучих и влажности проб, представлены в таблице 4.

Таблица 4  
Условия проведения опытов и полученные характеристики ПУТ

Параметры точек отбора и характеристики ПУТ	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
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



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 влаги, так и летучие.

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

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

$$C = 1 - \exp(-k \cdot \tau), \quad (13)$$

где  $C$  – относительное количество выделившихся летучих веществ к моменту времени  $\tau$ ;  $k$  – константа скорости процесса выделения летучих,  $\text{с}^{-1}$ .

Величина  $k$  зависит от температуры процесса по следующей экспоненциальной зависимости:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right), \quad (14)$$

где  $k_0$  – базовая константа скорости процесса выделения летучих веществ,  $\text{с}^{-1}$ ;  $E$  – 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 для расчетов выхода летучих по однокомпонентной схеме использованы следующие значения:  $E=60,7$  МДж/кмоль,  $k_0=212 \text{ с}^{-1}$ .

В случае изменяющейся температуры возможно использование ее среднеинтегрального значения. Для 1, 7 и 9-ой горелок из выражения (13) были определены значения константы скорости процесса выделения летучих и получены значения, приведенные в Табл. 5.

Таблица 5  
Значения констант скорости выделения летучих,  
установленные в результате обработки  
экспериментальных данных

Наименование	№ горелки		
	1	7	9
Значения $k$	0.305	0.282	0.315

При помощи метода наименьших квадратов для трех экспериментальных точек (горелки № 1, № 7 и № 9) определено значение константы скорости процесса возгонки летучих веществ для аппроксимирующего выражения. Полученное значение  $k$  составляет 0,302. На рис. 5 представлено сопоставление аппроксимирующей кривой и точек экспериментальных данных.

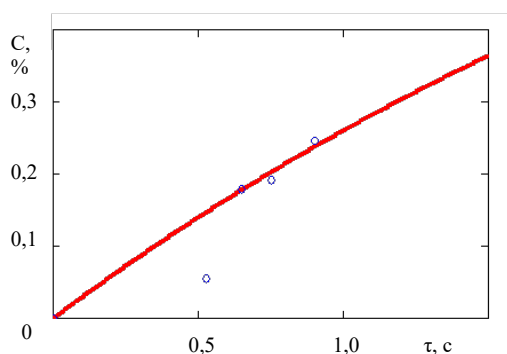


Рис. 5. Экспериментальные данные и аппроксимирующая кривая, описывающая динамику выхода летучих из угля при предварительном контакте с горячим воздухом.

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. 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 ее воспламенение 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. 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.

**В пятом разделе** решается вопрос о влиянии степени газоплотности топки на степень выгорания ПУТ.

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

Особый 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 негазоплотной 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-100. Состав угля, %:  $C^r=90$ ;  $H^r=4$ ;  $N^r=0,94$ ;  $O^r=4$ ;  $S^r=1,06$ ;  $A^c=19$ ;  $W^p=0,7$ .

Исследование проведено по следующей схеме:

– величина  $\alpha_t$  зафиксирована на уровне 1,19. Для проведения численных экспериментов сумма дополнительных поступлений воздуха  $\Delta\alpha_{пп} + \Delta\alpha_t$

меняется от 0 до 0,15 с шагом 0,01. При этом коэффициент расхода воздуха, формируемый при помощи ДВ, определяется как  $\alpha_T - (\Delta\alpha_{\text{пл}} + \Delta\alpha_T)$ ;

– для каждого случая определяется адиабатическая температура горения  $T_a$  при помощи стандартных зависимостей;

– для каждого случая определяется температура продуктов сгорания на выходе из топки при помощи набора зависимостей;

– далее при помощи последовательности действий, предложенной и основывающейся на использовании специальных номограмм, определяется средняя температура факела в зависимости от безразмерной температуры уходящих газов;

– определяются значения константы скорости реакции окисления углерода до углекислоты;

– при помощи усовершенствованной математической модели расчета выгорания полифракционного факела определяется механический недожог.

Установленные в результате численного исследования зависимость адиабатной температуры горения и температуры продуктов сгорания на выходе из топки от коэффициента присоса воздуха в топку представлены на рис. 6. Зависимость средней (действующей) температуры факела от уровня присоса воздуха в топку приведена на рис. 7, а зависимость константы скорости реакции окисления углерода от уровня присоса воздуха в топку на рис. 8.

Определенная при помощи расчетной программы зависимость механического недожога от коэффициента присоса воздуха в топку представлена на рис. 9.

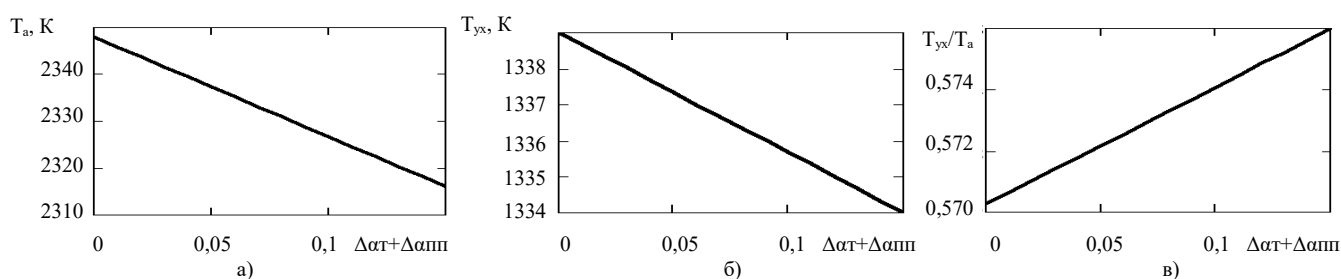


Рис 6. Зависимость характерных температур в топке в зависимости от уровня присоса воздуха в топку: а – адиабатическая температура горения, б – температура продуктов сгорания на выходе из топки, в – безразмерная температура уходящих газов.

Из анализа результатов расчетов, представленных на рис. 6 – 9, можно заключить, что между характерными значениями  $\Delta\alpha_T + \Delta\alpha_{\text{пл}}$ , 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 1643 К, 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.

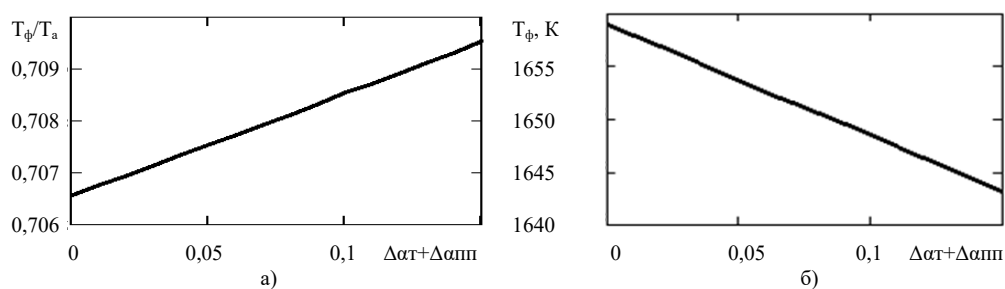


Рис. 7. Зависимость средней (действующей) температуры факела от уровня присоса воздуха в топку: а – безразмерная средняя температура факела, б – абсолютное значение действующей температуры факела.

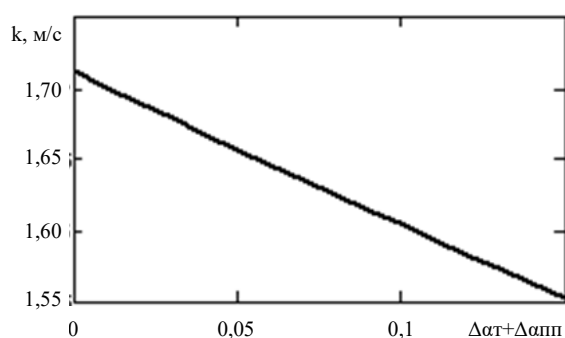


Рис. 8. Зависимость константы скорости реакции окисления углерода от уровня присоса воздуха в топку

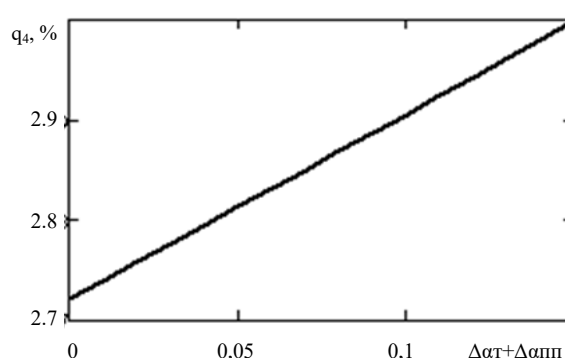


Рис. 9. Зависимость величины механического недожога от уровня присоса воздуха в топку.

**В шестом разделе** изучены экологические и экономические характеристики произведенных усовершенствований технологии.

Измерения экологических показателей проводились до внедрения всех конструктивных изменений в конструкцию котла, а также после перехода на газоплотные топки, замены основных горелок и после изменения схемы трассировки пылепроводов высокой концентрации. Полученные результаты внесены в таблицу 6.

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<sup>3</sup> до 2746 мг/м<sup>3</sup>), запылённость дымовых газов снизилась почти в два раза (от 37,80 мг/м<sup>3</sup> до 19,73 мг/м<sup>3</sup>), мощность выбросов золы в атмосферу уменьшалась соответственно на 40 % (от 700,9 г/с до 419,0 г/с).

Таблица 6  
Экологические показатели до и после внедрения мероприятий

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

Для оценки экономической эффективности 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)

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 табл. 7.

Таблица 7  
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

Уменьшение доли расхода природного газа на выработку 1 кВт·ч электрической энергии, уменьшение присосов холодного воздуха, а также 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 (Табл. 8).

Таблица 8

## 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 снизится на 0,06 рос. руб. с 0,638 рос. руб. до 0,578 рос. руб. Если учесть, что в 2018 году Старобешевская ТЭС выработала 7 445 612 тыс.кВт·ч электроэнергии, то годовая экономия составила в 446 736 720 рос. руб.

**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 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. 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 ППВК 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  $20^\circ\text{C}$  и незначительному повышению температуры уходящих газов порядка  $3^\circ\text{C}$ . При этом средняя температура факела увеличивается на  $11^\circ\text{C}$ . 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<sup>3</sup> до 2746 мг/м<sup>3</sup>, запылённость дымовых газов снизилась от 37,80 мг/м<sup>3</sup> до 19,73 мг/м<sup>3</sup>, мощность выбросов золы в атмосферу уменьшалась от 700,9 г/с до 419,0 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 ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых изданиях из перечня ВАК ДНР:

1. Бирюков А.Б. Исследование степени выгорания пылеугольного топлива при обеспечении предварительного контакта с горячим воздухом / А.Б. Бирюков, В.А. Семергей // Вестник МЭИ. – 2019. – № 1. – С. 29-34.
2. Бирюков А.Б. Исследование увеличения КПД котла, сжигающего пылеугольное топливо, при повышении степени газоплотности топки / А.Б. Бирюков, В.А. Семергей, И.И. Шевелева // Вестник Иван. гос. энергет. ун-та. – 2018. – № 3. – С. 14-19.
3. Бирюков А.Б. Методика определения времени задержки воспламенения при сжигании пылеугольного топлива в конкретных условиях / А.Б. Бирюков, С.М. Сафьянц, В.А. Семергей и др. // Вестник Иван. гос. энергет. ун-та. – 2018. – № 5. – С. 33-38.

### Публикации в других изданиях:

4. 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.
5. Бирюков А.Б. Математическая модель выгорания пылеугольного топлива в топке энергетического котла / А.Б. Бирюков, В.А. Семергей // Вестник ДонНТУ. – 2017. – № 1 (7). – С. 32-37.
6. Бирюков А.Б. Варианты реконструкции котлов типа ТП-100 энергоблоков 200 МВт / А.Б. Бирюков, В.А. Семергей // Энергетические системы: Тр. III Междунар. науч.-техн. конф., 19-20.11.2018, Белгород, 2018. – С. 18-22.