

На правах рукописи

Мессерле Алексей Владимирович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО
ТОПЛИВА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ**

Специальность 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва-2006 г.

Работа выполнена в Отраслевом Центре плазменно-энергетических технологий РАО ЕЭС России при АО «Гусиноозерская ГРЭС»

Научный руководитель:

д.т.н., проф. Трусов Б.Г.

Официальные оппоненты:

д. ф.-м.н., проф. Быков В.И.

Филимонова Е.А.

Ведущая организация

У1751355
Мессерле А.В.
Математическое
моделирование процессов
термохимической подготовки
пылеугольного топлива с и...
2006 0-00

й государственный
ниверситет.

У 1751355

заседании
рственном
г.Москва,

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

печатью
ауманская
ационного

с
у
д
к

а.
НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана
Б.



1751355

Актуальность проблемы. В последние десятилетия значительное внимание в мире уделяется повышению эффективности и экологической безопасности котельных агрегатов пылеугольных тепловых электрических станций (ТЭС), вырабатывающих более 40% электрической и тепловой энергии. При этом наблюдается общемировая тенденция снижения качества энергетических углей, что приводит к увеличению использования непроектных топлив, т.е. углей с теплотехническими характеристиками, отличающимися от проектных. В связи с этим ухудшаются как технико-экономические, так и экологические показатели работы котлоагрегатов. По этой причине большую актуальность приобретает создание и применение новых технологий эффективного сжигания твердых топлив, независимо от их качества.

Одной из таких перспективных технологий, внедренной на ряде угольных электростанций России и зарубежных стран, является термохимическая подготовка топлива (ТХПТ) к сжиганию с использованием генератора низкотемпературной плазмы (плазмотрона). Эта технология позволяет полностью устранить использование мазута, традиционно применяемого для растопки котлоагрегата и для стабилизации горения пылеугольного факела. Однако проведение натурных испытаний плазменных пылеугольных горелочных устройств характеризуется чрезвычайно высокой стоимостью и трудозатратами, несмотря на их внешнюю простоту. Диссертация посвящена решению актуальной проблемы создания методов численного моделирования процессов плазменной термохимической подготовки топлив для выбора оптимальных параметров, конструктивных особенностей и режимов работы горелочных устройств.

Цель работы:

- разработка физической и математической моделей процессов, протекающих при ТХПТ в горелке (проточном цилиндрическом канале) с плазменным источником;
- создание на основе модели программного комплекса для численного моделирования параметров процесса;
- проведение параметрического анализа режимов ТХПТ и сравнение результатов моделирования с опытными данными;
- разработка технологических рекомендаций для проектирования горелочных устройств.

Научная новизна работы:

- разработана методика численного моделирования процессов воспламенения и ТХПТ к сжиганию при наличии инициирующего плазменного источника, впервые позволившая объяснить факт возможности растопки котлоагрегата с помощью плазмотронов, мощность которых составляет 0,5-3% от тепловой мощности последнего

- в математическую модель, описывающую физико-химические процессы в канале термоподготовки, впервые введены эмпирические характеристики факела плазменного источника и особенности его взаимодействия с потоком аэросмеси;
- в результате проведенных численных исследований выявлен ряд закономерностей, характерных для плазмохимического процесса ТХПТ: обнаружено явление резкого затухания пылеугольного факела на выходе из горелочного устройства при снижении мощности плазмотрона ниже некоторого значения; выявлено незначительное влияние повышения мощности плазмотрона на температуру и концентрации реагентов при устойчиво горящем факеле;

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительным согласованием результатов расчетов и экспериментальных данных, полученных на испытательных стендах и ТЭС и базируется на научно обоснованном выборе исходных предпосылок, использованных при построении математической модели и оценке принятых при записи системы уравнений допущений. Эмпирические константы, замыкающие систему уравнений математической модели, взяты по результатам стендовых и натурных исследований плазменной технологии воспламенения пылеугольного факела.

Практическая значимость работы:

- создана программа численного моделирования процессов ТХПТ к сжиганию в прямоточном канале, оснащенном плазмотроном. Она может быть использована как для численного исследования процессов в конкретных условиях, так и при проектировании новых горелочных устройств с внутренним тепловым источником (плазмотрон, СВЧ источник);
- проведены серийные расчеты воспламенения различных типов энергетических углей в прямоточном канале с варьированием параметров процесса (мощности и числа плазмотронов, расхода угольной пыли, коэффициента избытка первичного воздуха, влажности и др., а также геометрических параметров канала ТХПТ);
- согласование результатов моделирования с экспериментальными данными (с погрешностью не более 15%), позволяет рекомендовать созданную компьютерную программу для использования при проектировании плазменно-угольных горелок на ТЭС.

Апробация работы.

Результаты исследований по теме диссертации обсуждались на III Международной научно-технической конференции «Плазменно-энергетические процессы и технологии» (Улан-Удэ, 2000г.), первом Международном симпозиуме «Горение и плазмохимия» (Алма-Ата, 2001г.), научной конференции «Новые технологии», посвященной 300-летию инженерной науки в России (Улан-Удэ, 2001 г.), I Всероссийской конференции «Прикладные аспекты химии высоких энергий» (Москва, 2001г.), III Международном симпо-

знуме по теоретической и прикладной плазмохимии (Плес, 2002г.), научно-методических семинарах МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва), Отраслевого Центра плазменно-энергетических технологий РАО ЕЭС России (Гусиноозерск), Института проблем горения (Алма-Ата) и Новосибирского государственного технического университета (Новосибирск), проведенных в 1998-2005 гг.

Личный вклад автора заключается в разработке физической и математической моделей, составлении и отладке программы расчетов «Плазма-муфель», выполнении численных параметрических исследований и анализе полученных результатов, участии в экспериментах на огневом стенде ОЦ ПЭТ РАО ЕЭС России и Кураховской ТЭС (Украина).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах. При этом в совместных публикациях диссертанту полностью принадлежит материал, описывающий создание комплекса программ, проведение расчетов, получение и обработку результатов численного исследования. Участие диссертанта в вопросах, связанных с обобщением результатов и с выработкой технологических рекомендаций, составляет 50%.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, трех глав, списка литературы из 125 наименований и акта об использовании результатов работы. Содержание работы изложено на 117 страницах текста, включая 48 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, представлено современное состояние проблемы, сформулированы цели исследования, научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения диссертации.

Первая глава посвящена анализу современного состояния проблемы повышения эффективности использования низкосортных углей в теплоэнергетике и дано определение процесса термохимической подготовки топлив к сжиганию.

Рассмотрена проблема, возникающая из-за увеличения потребления мазута на пылеугольных ТЭС вследствие сжигания на них непроектных типов угля. Приведены сведения о мировом топливном балансе за последние годы, из которых следует, что потребление угля в мире неуклонно возрастает. Одновременно при этом снижается качество энергетических углей, что приводит к увеличению потребления второго топлива (как правило, природного газа или мазута) на пылеугольных теплоэлектростанциях. Существующие технологии сжигания твердых топлив не в полной мере удовлетворяют возрастающим эколого-экономическим требованиям к эксплуатации ТЭС.

Описаны особенности процесса ТХПТ к сжиганию. Его основу составляет нагрев электродуговой плазмой небольшой части пылеугольного потока до

температуры выделения летучих и частичной газификации коксового остатка. Тем самым из меньшей части аэросмеси, прошедшей зону электродугового разряда, получают независимо от качества исходного угля высокорекреационное топливо (горючий газ + коксовый остаток), способное воспламенять основной поток аэросмеси при смешении с ним и стабилизировать процесс горения факела. Приведен обзор существующих методов ТХПТ, как традиционных - с использованием второго высокорекреационного топлива (природный газ или мазут), так и новых (с помощью СВЧ - установок). Проанализированы их достоинства и недостатки. Подробно описана технология ТХПТ с использованием плазмотронов. Сформулированы принципы ее осуществления. Процессы термохимической подготовки твердых топлив, как правило, носят алло-автотермический характер, что означает активацию с помощью внешнего источника небольшого количества топлива. В дальнейшем активированное топливо уже само инициирует процессы горения оставшейся части угля. При этом процесс становится автотермическим. В главе приведены общие закономерности осуществления алло-автотермических процессов.

Проанализированы известные математические модели, описывающие процессы взаимодействия пылеугольного топлива с внутренним тепловым источником. Опубликованные расчетные методы включают совместное решение уравнений гидродинамики двухфазного потока с уравнениями тепло-массопереноса и уравнениями, описывающими кинетику химических превращений частиц угля и продуктов их сгорания. Ранние работы Смута и Пратта (L.D.Smoot, D.Y.Pratt), а также Лесински, Бароннет и Мейло (I.Lesinski, I.M.Baronnet, E.Meillot) были посвящены моделированию процессов пиролиза, газификации и сжигания угольных частиц в широком температурном интервале. В предложенных ими моделях не учитывалась полифракционность угольной пыли и считалось, что частицы и воздух попадают в зону реактора уже нагретыми до температуры начала реакций между ними, т.е. не рассматривался собственно процесс горения. В модели Калиненко, Жукова, Левицкого, Полака рассматривалась кинетика всех термохимических превращений в процессе движения и теплообмена угольных частиц. Считалось, что мощность электрической дуги равномерно распределена по объему реактора и было принято, что газ входит в зону плазменного реактора нагретым до температуры порядка 4000 К при низкой начальной температуре угольных частиц. Эти допущения не применимы для расчета используемых на ТЭС горелочных устройств, в которые поступает не разогретый, а холодный первичный воздух (400-500К).

В модели Устименко было учтено воздействие на поток теплового плазменного источника и введено понятие ступеней расчета (дискретных этапов подмешивания свежих порций пылеугольной смеси). Границы условных ступеней выбирались, исходя из достижения в конце ступени максимальной

суммарной концентрации горючих компонентов в газовой фазе ($\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{C}_6\text{H}_6$), образующихся в результате химических превращений топлива. Таким образом, в одномерной модели делалась попытка учесть пространственную неоднородность потока. Основным недостатком метода ступенчатого теплоподвода к реакционной смеси является осуществляемый априори выбор длин ступеней и количества пылеугольной смеси, первоначально попадающей в зону реакций. Модель Карпенко, принципиально не отличается от предыдущей за исключением того, что гомогенные превращения рассчитывались в приближении локального термодинамического равновесия.

Во второй главе рассмотрена физическая модель процесса термоподготовки пылеугольной смеси, приведено термодинамическое обоснование эффективности процесса ТХПТ энергетических углей к сжиганию. Схема простейшей горелки, оснащенной плазмотроном, приведена на рисунке.

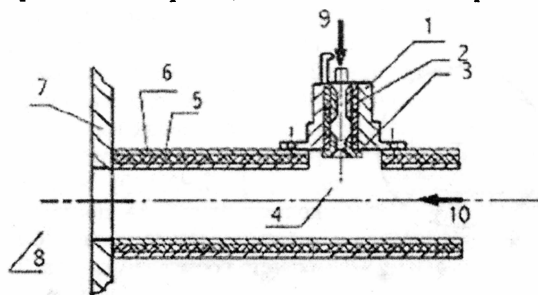


Рис.1. 1 - плазмотрон, 2 - катод, 3 - анод, 4 - зона реакций, 5 - огнеупорный материал (керамика, бетон), 6 - внешняя стенка канала, 7 - стенка котлоагрегата, 8 - топка котлоагрегата, 9 - подача плазмообразующего газа, 10 - подача аэросмеси (взвеси частиц угля в воздухе)

Двухфазный поток (полидисперсные угольные частицы + воздух-окислитель) со скоростью, определяемой расходом угольной пыли, коэффициентом избытка воздуха, геометрическими характеристиками горелки движется в цилиндрическом канале совместно с потоком плазмы из плазмотрона. Считается, что взвесь частиц угля, состоящая из некоторого числа размерных фракций равномерно распределена по объему в ламинарном потоке. Взаимодействие струи низкотемпературной воздушной плазмы ($T=3000-6000\text{ K}$) с пылеугольной смесью приводит к возникновению тепловой и газодинамической неоднородности потока, разделению фракций угольных частиц по скоростям и температуре, а также инициирует сложные физические и химические процессы: нагрев частиц пыли и выделение содержащихся в них летучих веществ, горение летучих углей в воздухе и плазменном потоке. Считается, что теплообмен между газовой фазой и угольными частицами происходит конвективным путем из-за разности температур фракций угольной пыли и газовой фазы. Теплообмен между частицами пыли и стенками канала в результате излучения не учитывается. Для аппроксимации явлений крупномасштабного перемешивания газовых потоков, происходящих в реальном горелочном устройстве вследствие больших градиентов температуры, в описание модели введено понятие подмешивания

При прохождении потока через область факела происходит перемешивание части холодной аэросмеси с плазмой, температура воздуха в канале становится выше температуры частиц пыли, что приводит к их нагреву и инициирует химические превращения угля. Идея подмешивания в том, что оно моделирует явления перемешивания потоков разного состава и температуры внутри горелки по радиусу канала в рамках одномерной модели. Эмпирический пространственный закон распространения зоны реакций задается, исходя из экспериментальных данных, полученных на стендах. Моделирование эффекта подмешивания приводит к необходимости учета разделения угольных частиц на фракции не только по размеру, но и по температуре (температура частиц в центральных областях канала выше, чем на периферии). При проведении расчетов рассматривается 5 размерных фракций угольных частиц, количество температурных фракций определяется заданным законом подмешивания и шагом расчетной сетки.

Схема подмешивания, приводящая к разделению угольных частиц на температурные фракции, показана на рисунке.

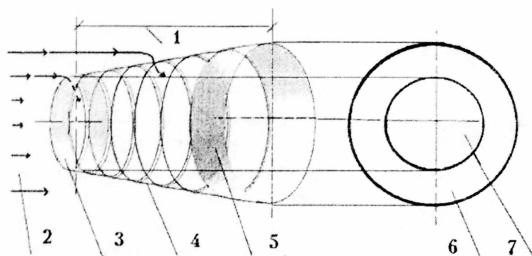


Рис.2. 1 - зона подмешивания
2 - подача пылеугольной смеси и подмешивание новых порций к расширяющейся зоне реакций, 3 - первое кольцо (шаг) разбиения, 4 - закон подмешивания, 5 - последний участок подмешивания, 6 - диаметр последнего кольца, 7 - диаметр начального кольца.

Все пространство внутри цилиндрического канала на длине подмешивания разбивается на цилиндры с постоянным шагом и с увеличивающимся по заданному закону диаметром. При увеличении диаметра зоны реакций происходит захват холодных порций аэросмеси. Считается, что на каждом шаге температура газа внутри кольца выравнивается за счет перемешивания газа, а температура частиц в силу их большой тепловой инерционности не успевает. Поэтому в кольце (5) в радиальной зоне (7) температуры частиц любой размерной фракции в случае протекающих реакций горения будут выше, чем температура той же фракции в зоне (6), позже “захваченной” расширяющейся зоной реакций и позже начавшей реагировать.

Приведено термодинамическое обоснование эффективности процесса ТХПТ энергетических углей к сжиганию.

Более 20 лет назад Ф.Блэкборн (Blackburn P.R.), анализируя энергозатраты на воспламенение угля плазменно-воздушной струей, экспериментально установил, что плазменная технология позволяет осуществлять устойчивое горение на энергоблоке 200 МВт (ТЭС «Мариэтта» США) с затратами тепловой мощности почти в 6 раз меньшими, чем в случае использования мазутной

горелки. Этот же эффект был экспериментально подтвержден при сравнении энергетической эффективности воспламенения пылеугольной аэроэсмеси плазменной струей, газовым факелом и термоэлектрическим нагревателем (Жуков, Карпенко, Буянтуев, Цыдыпов). При этом удельные энергозатраты в плазменном процессе оказались в 2,5 раза меньшими, чем при нагреве пылеугольного потока газовым факелом. Проведенные термодинамические расчеты дали объяснение этому факту и показали, что с помощью процесса ТХПТ, проходящего при дефиците кислорода, из угля в канале термоподготовки получается высокорекреационное двухкомпонентное топливо: горючий газ ($N_2 + CO + H_2$) + коксовый остаток, которое самовоспламеняется при попадании в топку котла при контакте с содержащимся там воздухом. Продукты сгорания мазутного факела, в противоположность этому, инициируют растопку только за счет собственного теплосодержания.

Дается описание исходных данных и принятых допущений, необходимых для замыкания математической модели. Моделирование процессов термообработки пылеугольных топлив ведется в работе с учетом предположений об одномерности и стационарности процесса, безградиентном характере нагрева угольных частиц, сферической форме частиц угольной пыли, отсутствии взаимодействия частиц между собой, наличии только конвективного теплообмена между частицами пыли и газовой фазой. Эти предположения позволили ограничиться решением системы ОДУ первого порядка, что значительно упростило алгоритм моделирования и существенно ускорило время выполнения расчетов.

Система уравнений математической модели включает в себя дифференциальные уравнения сохранения импульса и энергии по длине реакционного канала постоянного сечения и уравнения, описывающие процесс выделения летучих веществ угля.

- уравнение сохранения импульса для газовой части потока аэроэсмеси

$$\rho u \frac{d(\rho u)}{dx} = - \sum_{l=1}^L F_l, \quad \text{где} \quad F_l = C_{Dl} \frac{\rho(u - u_l)^2}{2} \pi R_l^2 N_l \quad (1)$$

l , R_l , N_l – индекс размерных фракций частиц, их радиус и число частиц фракции l в единице массы, F_l – сила аэродинамического сопротивления частицы угольной пыли, ρ , u – плотность и скорость газовой фазы потока, C_{Dl} – коэффициент сопротивления;

- уравнение сохранения импульса для угольных частиц фракции l

$$m_l u_l \frac{du_l}{dx} = F_l, \quad m_l \text{ и } u_l - \text{масса и скорость частицы} \quad (2)$$

- уравнение сохранения энергии для газовой части потока

$$\rho u \frac{dI}{dx} = \sum_{j=1}^k \rho u \frac{dn_j}{dx} I_j - \sum_{l=1}^L Q_l + Q_r + Q_p, \quad (3)$$

n_j , I_j – концентрация и энтальпия j -й компоненты газовой фазы; Q_l –

теплообмен между газом и частицами (коэффициент теплоотдачи α определяется с помощью критериального уравнения теплообмена, справедливого для обтекания сферы ламинарным потоком; Q_p - вклад энергии от дуги плазмотрона, Q_r - тепловой эффект реакций выделения летучих из угля;

- уравнение сохранения энергии для угольных частиц фракции l

$$\rho_l u \frac{dI_l}{dx} = Q_c - Q_l, \quad (l = 1, 2 \dots L), \quad (4)$$

Q_c - вклад от горения углерода частицы, ρ_l - плотность частиц угля фракции l

Начальными условиями являются значения температуры и скорости воздуха и частиц угольной пыли на входе в канал.

Основной энергетический вклад в процесс разогрева газовой части аэроsmеси дают реакции горения летучих $\sum_{i=1}^k \rho_i u \frac{dn_i}{dx} I_i$. Эта величина определяется путем пошагового расчета равновесного состава продуктов горения и добавляемой массы летучих угля.

Правомoрность использования термoдинамически равновесного приближения оправдывается высокими скоростями протекания процессов превращений в газе по сравнению с реакциями на поверхности частиц. Принцип локального термoдинамического равновесия для описания реакций горения в газовой фазе достаточно широко используется в практике математического моделирования. Это допущение позволяет использовать для расчета химических взаимодействий и связанных с ними тепловых эффектов, а также концентраций компонентов газовой фазы универсальные термoдинамические методы, использующие принцип максимума энтропии, что позволило отказаться от рассмотрения одновременно протекающих сотен химических реакций и резко сократить время вычислений.

Рассмотрены особенности численного решения приведенной системы уравнений. Поскольку одномерная модель не позволяет учесть эффект радиальной неоднородности потока, была принята полуэмпирическая модель добавления новых порций аэроsmеси к первоначальной зоне реакций, создающейся при смешении плазменной струи с аэроsmесью. Закон смешения на основе экспериментов представляется в виде зависимости диаметра зоны от длины участка подмешивания.

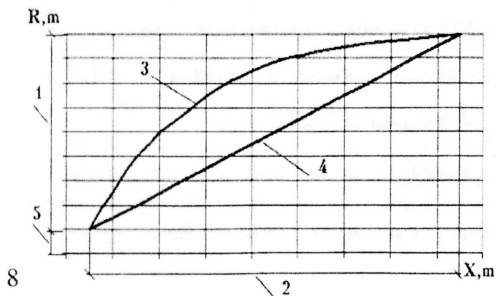


Рис.4. x - продольная координата. Участок перемешивания (2) разбивается на шаги, каждому из которых соответствует цилиндрическая зона с шириной Δx и радиусом R , изменяющемся в диапазоне (1) по логарифмическому (3) линейному (4) или другому закону; (5) - начальный диаметр зоны

подмешивания (диаметр факела плазмотрона).

На каждом шаге необходимо определить характеристики газовой фазы (состав, температуру, скорость движения внутри канала) и характеристики частиц пыли (температуру, скорость, состав). Для расчета выполняется следующая последовательность действий:

А) Задается начальная среднemasовая температура факела плазмотрона. Диаметр начальной зоны подмешивания принимается равным задаваемому из эмпирических соображений диаметру факела плазмотрона. В первый цилиндр попадает часть струи из сопла плазмотрона, масса которой равна:

$$\Delta M_{пл} = \frac{m_{пл} \Delta x}{L_{пл}}, \text{ — она передает потоку некоторое количество энергии,}$$

$$Q_i^{пл} = \Delta M_{пл} N_{пл} \frac{\Delta x}{u_i}, 0 < \Delta x \leq L_{пл}; Q_i^{пл} = 0, \Delta x > L_{пл}; i\text{-номер шага} \quad (5)$$

При этом температура воздуха в этом цилиндре усредняется, т.е. считается, что происходит полное мгновенное перемешивание. Тот же процесс применяется к цилиндрам, находящимся на расстоянии, не превышающем длины факела плазмотрона ($L_{пл}$), также задаваемой, исходя из эмпирических данных.

Б) Расчет количества выделившихся летучих из частиц угля производится путем решения уравнений Аррениуса первого порядка. Общая масса выделившихся летучих по реакции r из частиц каждой из размерных фракций l на каждом шаге i определяется суммированием.

В) Изменение температуры газа рассчитывается по формуле.

$$\frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} = \left(\frac{1}{\rho_{i-1} U_{i-1} c_{pi}} \right) \left(\sum_{j=1}^J N_j S_j \alpha_j (T_{i-1} - T_{li-1j}) + Q_{r_i}^{пл} + Q_{r_i} + Q_i^{лет} \right) \quad (6)$$

S_j - площадь поверхности одной частицы фракции l ;

Расчет величины $Q_i^{лет}$, характеризующей энергетический вклад от горения выделившихся летучих, производится в предположении о мгновенном установлении равновесия между всеми компонентами газовой фазы.

Г) Изменение температуры частиц угля размерной фракции l на шаге i :

$$\frac{T_{li} - T_{li-1}}{\Delta x} = \left(\frac{1}{\rho U_{i-1} C_{pi}} \right) \left(\sum_{j=1}^J S_j \alpha_j (T_{i-1} - T_{li-1j}) + Q_i^f \right) \quad (7)$$

Д) Изменение скорости газа на шаге i :

$$\frac{U_i - U_{i-1}}{\Delta x} = - \left(\frac{1}{\rho_i U_{i-1}^2} \right) \left(\sum_{l=1}^L C_{Dl} \frac{\pi r_l^2}{2} \rho_l (U_{i-1} - U_{li-1}) N_l \right) \quad (8)$$

Е) Изменение скорости частиц фракции l :

$$\frac{U_{li} - U_{li-1}}{\Delta x} = \left(\frac{1}{\rho_l U_{li-1}^2} \right) \left(C_{Dl} \frac{\pi r_l^2}{2} \rho_l (U_{li-1} - U_{li-1}) \right) \quad (9)$$

Ж) Расчет количества выделившегося летучего компонента r из частицы размерной фракции l на шаге i :

$$\frac{\Delta m_{rli}^{\text{выд}}}{\Delta t_{li}} = \sum_{j=1}^J K_r(T_{lij}) m_{rli-1,j}, \quad (10)$$

K_r - константа скорости реакции выделения летучего компонента r

Таким образом, после прохождения процедуры расчета по пунктам А-Ж на выходе будут получены все нужные характеристики газовой фазы (состав, энтальпия, теплоемкость при постоянном давлении, температура и скорость) а также скорости и температуры частиц угля. Эти данные являются начальными для расчета следующего шага. В соответствии с заданным законом расширения зоны реакций происходит “добавление” очередной порции холодной аэросмеси. После этого шаги А-Ж повторяются. Расчет ведется до тех пор, пока не будет выполнен по всей длине канала.

Шаг разбиения длины канала при решении системы уравнений (6)-(10) выбирался исходя из требуемой точности вычислений. Критерием являлась температура газовой фазы на выходе из канала. Шаг разбиения Δx последовательно уменьшался на 10% до тех пор, пока максимальное изменение температуры на всей длине канала не становилось менее 1%. Для оценки: при начальной скорости аэросмеси (на входе в канал) равной 20 м/с достаточная длина шага, обеспечивающая необходимую точность, составила 0.015 м.

Компьютерная программа «Плазма-уголь», реализующая описанный алгоритм, была составлена на языке C++ применительно к среде операционной системы Windows. Программа проверена на тестовых примерах и показала свою работоспособность в условиях проведения серийных расчетов. Каждый расчет на ПЭВМ с процессором Intel Pentium 3 (CPU 1ГГц) занимает около 90 секунд, что позволяет проводить с помощью составленной программы серийные расчеты для параметрических анализов. Расчеты по программе дали возможность не только выяснить сущность процессов, приводящих к воспламенению угольных частиц под действием потока воздушной плазмы, но также определить геометрические параметры горелочного устройства для работы с конкретными типами углей. Результаты расчетов выдаются в виде таблиц значений температур газовой фазы и каждой из размерных фракций угольных частиц (осредненные по площади сечения канала), а также состава газовой фазы и скоростей газа и частиц.

В третьей главе приводятся результаты расчетов процессов воспламенения различных типов углей (начиная с низкорреакционных - антрациты, заканчивая высокорреакционными, что необходимо для того, чтобы

убедиться в достоверности получаемых результатов для широкого диапазона типов углей) и производится их сравнение с экспериментальными данными. В качестве примера на рис.5 приведено рассчитанное изменение состава газовой фазы продуктов термохимической подготовки угля, а на рис.6 – изменение среднemasовой температуры газа и размерных фракций угольной пыли. На приведенных графиках ось абсцисс направлена по длине канала

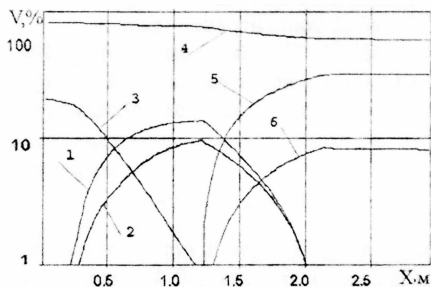


Рис.5. Объемные концентрации: 1 - H_2O , 2 - CO_2 , 3 - O_2 , 4 - N_2 , 5 - CO , 6 - H_2 (параметры численного эксперимента: Тугнуйский каменный уголь (выход летучих - 45%, влажность 5%, зольность 20 %), расход угля- 2000 кг/час, диаметр канала - 0.36 м, мощность плазмотрона- 70 кВт.)

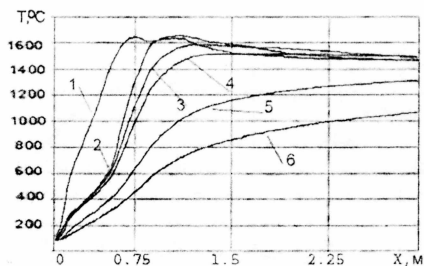


Рис.6. Температура: 1 – среднemasовая газовой фазы, фракций угольной пыли (мкм): №2 - 5, №3 - 15, №4 - 30, №5 - 70, №6 - 50. (параметры численного эксперимента: Донецкий антрацит (выход летучих-8%, влажность 5%, зольность 20 %), расход угля 1800 кг/час, диаметр канала - 0.4 м, Мощность плазмотрона-300 кВт).

На основе разработанного метода моделирования и созданной компьютерной программы проведено исследование влияния мощности плазмотрона, концентрации пыли в аэросмеси и влажности топлива на температуру и состав продуктов термохимической подготовки топлива.

А) *Влияние мощности плазмотрона на термохимическую подготовку низкореакционного донецкого антрацита* (выход летучих-8%, влажность 5%, зольность 20 %, расход угля 1500 кг/час, диаметр канала 0.4 м).

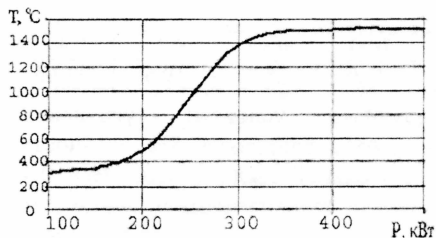


Рис. 7. Зависимость температуры факела от мощности плазмотрона. В результате моделирования найден диапазон мощности плазмотрона, достаточный для поддержания устойчивого режима горения аэросмеси на выходе из канала.

Б) Зависимость показателей термохимической подготовки угля от концентрации пыли в аэросмеси. Численный эксперимент проведен для следующих условий: тугунский высокорекреационный уголь (выход летучих 45%, влажность 5%, зольность 20%), расход 2000 кг/час, диаметр канала 0.36 м, мощность плазмотрона 70 кВт.

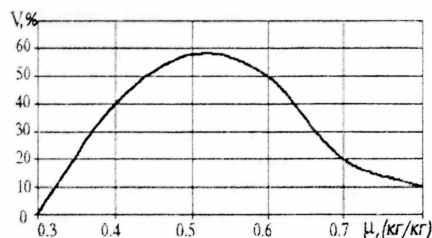
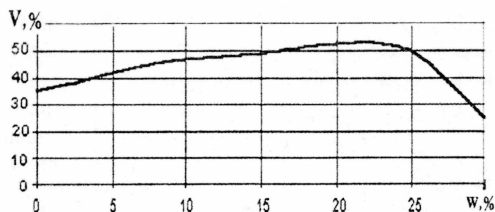


Рис.8. Зависимость объемной доли суммарного выхода CO и H_2 (горючих газов) от концентрации пыли в аэросмеси. V – объемная концентрация $\text{CO}+\text{H}_2$, μ – концентрация пыли в воздухе

В) Зависимость показателей термохимической подготовки угля от влажности угля (донецкий антрацит, расход 2000 кг/час, диаметр канала 0.4 м, мощность плазмотрона 300 кВт).

Рис.9. Зависимость суммарного выхода горючих газов от влажности.

W – влажность угля, V – объемная концентрация $\text{CO}+\text{H}_2$.



Расчеты показали, что при влажности угля более 25% для принятых условий моделирования, количество образующихся горючих газов CO и H_2 резко уменьшается. Это указывает на возможность затухания процесса горения.

Г) Зависимость показателей термохимической подготовки от скорости потока пылеугольной смеси на входе в канал. Изменение скорости потока достигалось за счет варьирования диаметра канала при прочих равных условиях.

Диаметр канала (м)	0,2	0,21	0,25	0,3	0,4
Скорость потока на входе (м/с)	44,23	40,01	28,31	19,65	11,05

Вычисления проводились для следующих условий: тугунский высокорекреационный уголь (выход летучих 45%, влажность 5%, зольность 20%), расход 2000 кг/час, концентрация угольной пыли в аэросмеси 0.4 кг/кг, мощность плазмотрона 80 кВт.

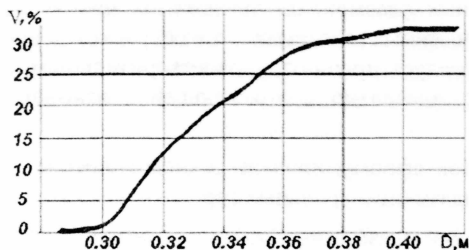


Рис.10. Зависимость суммарной концентрации горючих газов ($\text{CO} + \text{H}_2$) от диаметра канала.

Выполнено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными. Системы плазменного воспламенения были смонтированы на следующих промышленных котлоагрегатах.

1. Россия (Гусиноозерская ГРЭС) - котлы БКЗ – 640 и ТПЕ – 215 (энергоблоки № 2,3,5,6).

2. Словакия (ТЭС Вояны) - котел «TAVICI» (энергоблок №2)

3. Китай (Шаогуанская ТЭС) - котел F –100/W (энергоблок №3)

4. Украина (Кураховская ГРЭС) - котел ТП – 109 (энергоблок №4)

В ряде проведенных испытаний и штатной работы плазменных систем были получены результаты, достаточно хорошо согласующиеся с расчетными. Экспериментальные данные по ТХПТ антрацита были получены на станциях 2-4, по тугнуйскому каменному углю - на станции 1. Так, расхождение расчетных и экспериментальных значений температуры факела нигде не превышает 12%, скорости потока на выходе из канала 8%, а концентраций продуктов ТХПТ: для CO 5%, H_2 10 % и для CO_2 12 %. Сравнение данных приводится в работе в виде таблиц вида:

Сравнение экспериментальных (ТЭС Вояны) и расчетных результатов для термохимической подготовки антрацита

Характеристики процесса				Эксперимент				Расчет			
№	Расход угля, (т/час)	μ , кг/кг	N, кВт	T, °C	Объемная доля, (%)			T	Объемная доля, (%)		
					CO	H ₂	CO ₂		CO	H ₂	CO ₂
1	2.0	0.4	200	390	---	---	---	402	---	---	2.1
2	2.0	0.4	300	1430	31.2	9,0	2,1	1410	30.1	8.2	---
3	2.0	0.4	400	1522	33.4	9,9	1,2	1491	33.7	8,4	---

В таблице: μ -концентрация угольной пыли, N - мощность плазмотрона, T- температура.

Учитывая сложность рассмотренных плазменных двухфазных процессов ТХПТ в многокомпонентных гетерогенных системах, такое расхождение между расчетом и экспериментом следует признать удовлетворительным, а саму математическую модель адекватно отражающей основные закономерности плазменной ТХПТ.

На основании проведенных расчетов сформулированы технологические рекомендации для проектирования плазменно-угольных горелок

Проведение численных исследований плазменных процессов безмазутного воспламенения пылеугольного топлива с использованием разработанной математической модели позволяет "априори" определить неочевидные особенности процессов ТХПТ и основные параметры плазменно-угольных горелок и уже на этой основе предложить технологические рекомендации для их проектирования. Программная реализация разработанной математической модели позволяет рассчитать поля температур и скоростей газа и частиц, концентраций реагентов внутри канала и его длину, необходимую для завершения в нем процессов ТХПТ.

Выводы

1. Разработан метод численного исследования процессов плазменного воспламенения и ТХПТ к сжиганию, основанный на использовании математической модели, учитывающей мультифракционность и характер взаимодействия пылеугольной аэросмеси с внутренним плазменным источником, впервые позволившей объяснить факт возможности растопки котлоагрегата с помощью плазмотрона, мощность которого составляет 0,5-3% от тепловой мощности котлоагрегата.

2. Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений математической модели, описывающих движение, нагрев и термохимические превращения топлива и окислителя, реализовано в виде компьютерной программы "Плазма-муфель", позволяющей для конкретного набора исходных данных рассчитывать основные параметры плазменно-угольных горелок при их проектировании.

3. Проведенный комплекс численных экспериментов для процессов плазменного воспламенения основных энергетических углей (бурых, каменных и антрацитов) в прямоточных плазменно-угольных горелках при варьировании рядом управляющих параметров (электрическая мощность и число плазмотронов, концентрация пыли в аэросмеси и влажность топлива) выявил ряд основных закономерностей и особенностей процесса ТХПТ.

4. Обнаружены и теоретически объяснены следующие явления: слабая зависимость параметров устойчиво горящего пылеугольного факела от мощности плазмотрона в горелке; резкое затухание факела при уменьшении мощности плазмотрона ниже минимально допустимой критической

величины; незначительное влияние на температуру и концентрацию продуктов ТХПТ повышения мощности плазмотрона больше некоторой предельной величины; получила объяснение высокая энергетическая эффективность плазменных методов термохимической подготовки по сравнению с традиционными.

5. Проведено сравнение опытных и расчетных данных для температур, скоростей и концентраций основных компонентов в процессе плазменного воспламенения энергетических углей на ряде ТЭС России, Украины, Словакии и Китая. Полученные расхождения эксперимента и расчета не превышают 15%, что свидетельствует об удовлетворительном согласии математической модели и ее программной реализации с реальными процессами плазменного воспламенения углей.

6. Созданные программные средства использовались для проектирования промышленных плазменно-угольных горелок в Отраслевом Центре плазменно-энергетических технологий РАО ЕЭС России в 2000-2003 г.г.

Список публикаций по теме диссертации

1. Математическое моделирование плазмохимической переработки углей /Е.И. Карпенко, А.Б. Устименко, Б.Г. Трусов, А.В. Мессерле //Прикладные аспекты химии высоких энергий: Материалы I-ой Всероссийской конференции. М., 2001. –С.99–100.
2. Математическое моделирование плазменной термохимической подготовки твердых топлив к сжиганию в энергетических котлах /Е.И. Карпенко, В.С. Перегудов, А.В. Мессерле и др. //Горение и плазмохимия: Труды I Международного симпозиума. – Алматы, 2001.–С.107–110.
3. Плазменное воспламенение высокозольных углей в котле блока 210 МВт /В.С. Перегудов, М.М. Полячек, С.Н. Левченко и др. //Материалы III Международной научно-технической конференции. – Улан-Удэ, 2000. – С.79–84.
4. Применение плазменной технологии безмазутной растопки котлов и подсветки пылеугольного факела на энергоблоке 210 МВт Кураховской ТЭС /В.С. Перегудов, М.М. Полячек, С.Н. Левченко и др. //Сборник научных трудов ВСГТУ.– (Выпуск 8, Т.3). – (Улан-Удэ).– 2000. – С.223–228.
5. Камера термохимической подготовки топлива для системы плазменного воспламенения пылеугольного факела в энергетических котлах /Е.И.Карпенко, В.С. Перегудов, А.В. Яковенко и др. //Сборник научных трудов ВСГТУ.– Улан-Удэ, 2001. – С.161–167. (Юбилейная конференция, посвященная 300-летию инженерной науки в России.)

6. Камера термохимической подготовки как основной элемент системы плазменного воспламенения углей на ТЭС /Е.И. Карпенко, В.С. Перегудов, А.В. Яковенко, А.В. Мессерле //Теплоэнергетика. Физико-технические и экологические проблемы, новые технологии, технико-экономическая эффективность: Сборник научных трудов /Под ред. В.Е. Накорякова (Новосибирск).–2001.–Вып.5–С.158–163.
7. Карпенко Ю.Е., Мессерле А.В. Математическое моделирование процессов термохимической подготовки пылеугольных топлив к сжиганию в горелочных устройствах с плазменным источником //Материалы 3 международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии–Иваново, 2002.–С.183–186.
8. Мессерле А.В. Математическое моделирование процессов термохимической подготовки пылеугольных топлив к сжиганию в горелочных устройствах с плазменным источником //Химия Высоких Энергий.–2003.–№1.–С.35
9. Исследование СВЧ–плазменной технологии сжигания низкосортных углей /В.И. Казанцев, Д.М. Ваврив, П.М. Канило и др. //Теплоэнергетика. – 2002. – №12. – С.39–44.
10. Мессерле А.В. Численное исследование процессов плазмохимической подготовки пылеугольных топлив к сжиганию //Горение и плазмохимия.–2003.–№1.–С.42–49.

Подписано к печати **6.02.16** г. Заказ № **52** Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана