НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

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.

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

У 1751355

Ведущая орган ...й государственный университет.

...заседании ...рственном г.Москва,

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

...печатью ...ауманская ...ационного

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1751355

...Б.

Общая характеристика работы.

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

МГТУ
ИМ. Н. Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

- 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-

зиуме 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 высокореакционное двухкомпонентное 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 высокореакционного 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 ($CO+H_2+CH_4+C_6H_6$), 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.

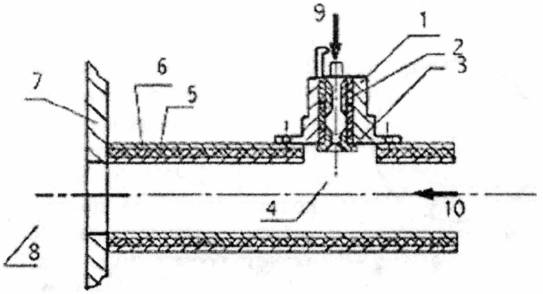


Рис.1. 1 - плазмотрон, 2 - катод, 3 – анод, 4 – зона реакций, 5 – огнеупорный материал (керамика, бетон), 6 – внешняя стенка канала, 7 - стенка котлоагрегата, 8 -топка котлоагрегата, 9– подача плазмо-образующего газа, 10 - подача аэросмеси (взвеси частиц угля в воздухе)

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 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 угля 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.

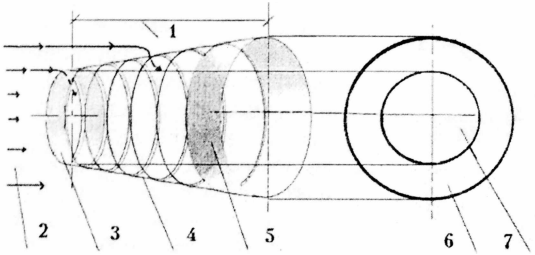


Рис.2. 1 - зона подмешивания 2 – подача пылеугольной смеси и подмешивание новых порций к расширяющейся зоне реакций, 3 - первое кольцо (шаг) разбиения, 4 - закон подмешивания, 5 – последний участок подмешивания, 6 - диаметр последнего кольца, 7 - диаметр начального кольца.

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 аэросмеси 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 высокореакционное 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 аэросмеси

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

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

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

-уравнение сохранения энергии для газовой части потока

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

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

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

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 аэросмеси дают реакции горения летучих $\sum_{i=1}^{k} \rho u \frac{dn_i}{dx} I_i$. Эта величина определяется путем пошагового расчета равновесного состава продуктов горения и добавляемой массы летучих угля.

Правомерность использования термодинамически равновесного приближения оправдывается высокими скоростями протекания процессов превращений в газе по сравнению с реакциями на поверхности частиц. Принцип локального термодинамического 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 термодинамические 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 аэросмеси к первоначальной зоне реакций, создающейся при смешении плазменной струи с аэросмесью. Закон смешения на основе экспериментов представляется в виде зависимости диаметра зоны от длины участка подмешивания.

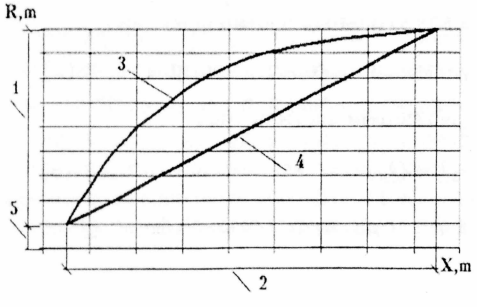


Рис.4. x – продольная координата. Участок перемешивания (2) разбивается на шаги, каждому из которых соответствует цилиндрическая зона с шириной Δx и радиусом R, изменяющемся в диапазоне (1) по логарифмическому (3) линейному (4) или другому закону; (5)-начальный диаметр зоны

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 среднемассовая 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: $\Delta M_{\text{пл}} = \dfrac{m_{\text{пл}}\Delta x}{L_{\text{пл}}}$, – она передает потоку некоторое количество энергии,

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

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.

$$\frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} = \left({}^{1}\!\!\diagup\!\!{}_{\rho_{i-1} U_{i-1} c_{pi}} \right) \left(\sum_{j=1}^{J} N_l S_l \alpha_l (T_{i-1} - T_{li-1j}) + Q^{\text{хл}}{}_i + Q_{ri} + Q_i^{\text{лет}} \right) \qquad (6)$$

S_l - площадь поверхности одной частицы фракции l;

Расчет величины $Q_i^{\text{лет}}$, 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:

$$\frac{T_{li} - T_{li-1}}{\Delta x} = \left({}^{1}\!\!\diagup\!\!{}_{\rho U_{i-1} C_{pl}} \right) \left(\sum_{j=1}^{J} S_l \alpha_l \left(T_{i-1} - T_{li-1j} \right) + Q_l^c \right) \qquad (7)$$

Д) Изменение скорости газа на шаге i:

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

Е) Изменение скорости частиц фракции *l*:

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

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

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

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 низкореакционных - антрациты, заканчивая высокореакционными, 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 среднемассовой температуры газа и размерных фракций угольной пыли. На приведенных графиках ось абсцисс направлена по длине канала

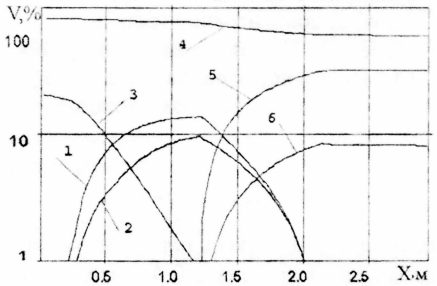


Рис.5. Объемные концентрации: 1 - H_20,2 - CO_2, 3 - O_2, 4 - N_2, 5 - CO, 6 - H_2 (параметры численного эксперимента: Тугнуйский каменный уголь (выход летучих - 45%, влажность 5%, зольность 20 %), расход угля- 2000 кг/час, диаметр канала – 0.36 м, мощность плазмотрона- 70 кВт.)

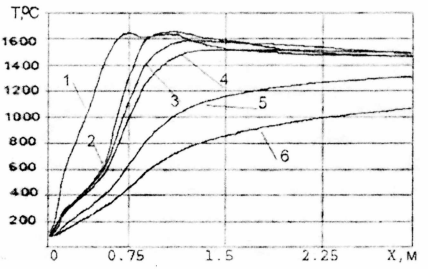


Рис.6. Температура: 1 – среднемассовая газовой фазы, фракций угольной пыли (мкм): №2 - 5 , №3 - 15 , №4 – 30 , №5 - 70 , №6 - 50. (параметры численного эксперимента: Донецкий антрацит (выход летучих-8%, влажность 5%, зольность 20 %), расход угля 1800 кг/час, диаметр канала – 0.4 м, Мощность плазмотрона-300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

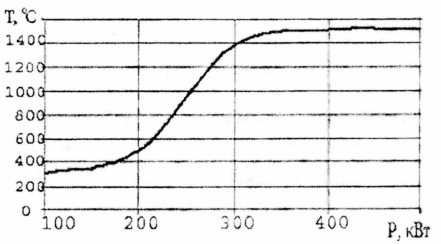


Рис. 7. Зависимость температуры факела от мощности плазмотрона.

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: тугнуйский высокореакционный уголь (выход летучих 45%, влажность 5%, зольность 20%), расход 2000 кг/час, диаметр канала 0.36 м, мощность плазмотрона 70 кВт.

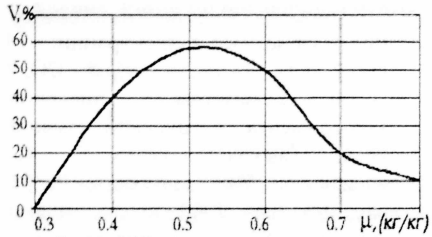
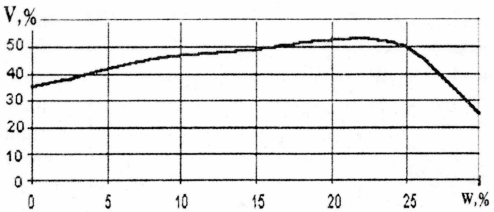


Рис.8. Зависимость объемной доли суммарного выхода CO и H_2 (горючих газов) от концентрации пыли в аэросмеси. V –объемная концентрация CO+H_2.,μ-концентрация пыли в воздухе

В) *Зависимость показателей термохимической подготовки 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 CO+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: тугнуйский высокореакционный 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.

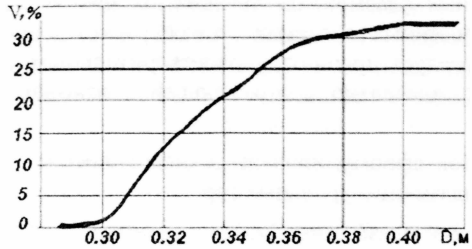


Рис.10. Зависимость суммарной концентрации горючих газов (CO + H_2) от диаметра канала.

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