

На правах рукописи



БОЙКО
Екатерина Евгеньевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ СЖИГАНИЯ
ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ ПРИ
ПЛАЗМЕННОМ СОПРОВОЖДЕНИИ В КОТЛОАГРЕГАТАХ ТЭС**

Специальность 05.14.14 - тепловые электрические станции, их
энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Овчинников Юрий Витальевич

Официальные оппоненты: **Мурко Василий Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
ЗАО Научно-производственное предприятие
«Сибкотехника», директор по науке

Цепенюк Алексей Иванович,
кандидат технических наук,
Общество с ограниченной ответственностью
«ЗиО – КОТЭС», генеральный директор

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Защита диссертации состоится 14 декабря 2018 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан « » октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Чичиндаев Александр Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Уголь был и остается, в ближайшем обозримом будущем, одним из основных энергетических ресурсов, как в мире, так и в России, и является самым распространенным, доступным и дешевым ресурсом из органических топлив. Расширение технологической базы использования угля – актуально. Одним из способов его использования является создание тонкодисперсных водоугольных суспензий (ТД ВУС) для последующего сжигания в энергетических установках широкого назначения, например, в циклонных предтопках (ЦП). Многими учеными в прежние годы наработаны как технологии создания ТД ВУС, так и изучены вопросы его сжигания, в том числе в аппаратах циклонного типа. Вместе с тем имеются проблемы, сдерживающие развитие данной технологии. Наиболее важными из них являются отсутствие надежного методического инструментария для создания собственно циклонных предтопок с гарантированными характеристиками по мощности и параметрам процессов и сложности воспламенения высокообводненного топлива.

Настоящая работа направлена на усовершенствование технологии ТД ВУС при его сжигании в циклонных предтопках котельных агрегатов.

Целью работы является разработка методов создания аппаратов циклонного типа для котлоагрегата с надежным воспламенением и сжиганием тонкодисперсных водоугольных суспензий при плазменном сопровождении.

Задачи работы:

1. Разработка кинетической модели горения ТД ВУС в циклонном предтопке.
2. Разработка методики конструкторского расчета циклонного предтопка в инженерной постановке.
3. Анализ влияния параметров и характеристик горения на конструкцию циклонного предтопка.
4. Разработка методики плазменного воспламенения ТД ВУС в циклонном предтопке.
5. Разработка методики согласования балансовых уравнений для снижения неопределенности в процессе сжигания ТД ВУС.
6. Разработка методики технико-экономического обоснования применения плазменного розжига ТД ВУС в циклонном предтопке.
7. Выработка практических рекомендаций.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые построена модель горения высокообводненной тонкодисперсной угольной суспензии в циклонном предтопке, разработаны методы конструкторского расчета ЦП в инженерной постановке, метод плазменного воспламенения ТД ВУС с определением необходимой мощности плазмотрона, метод согласования балансов для снижения неопределенности в процессе

сжигания ТД ВУС, метод технико-экономического обоснования применения плазменного розжига ТД ВУС.

Проведен анализ влияния параметров и характеристик горения на конструкцию ЦП, выработаны практически рекомендации по применению.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Кинетический метод горения ТД ВУС в циклонном предтопке.
2. Метод конструкторского расчета циклонного предтопка в инженерной постановке.
3. Влияние параметров и характеристик горения на конструкцию циклонного предтопка.
4. Метод плазменного воспламенения ТД ВУС в циклонном предтопке.
5. Метод согласования балансовых уравнений для снижения неопределенности в процессе сжигания ТД ВУС.
6. Метод технико-экономического обоснования применения плазменного розжига ТД ВУС в циклонном предтопке.
7. Результаты исследований параметров и характеристик горения и плазменного воспламенения ТД ВУС в циклонном предтопке, согласования балансовых уравнений и практические рекомендации.

Методы исследования: расчетно-аналитические, математического моделирования, балансовые методы. Все методы применены в инженерной постановке.

Достоверность подтверждается сравнением результатов с экспериментальными данными на всех этапах работы, а так же применением (в основе используемых методов) фундаментальных законов сохранения.

Личный вклад: все результаты, представленные без ссылок на другие источники, получены автором.

Практическая значимость работы: результаты работы использованы в организациях ЗАО «ЗиО-КОТЭС» и «Котэс – Наука» для проектирования установок, использующих ТД ВУС на ТЭС и в учебном процессе НГТУ при подготовке студентов и магистрантов дневной формы обучения по направлению 13.03.01 - «Теплоэнергетика и теплотехника».

Апробация работы: Основные результаты исследований докладывались на 12ой международной научно-технической конференции «Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики. Пути решения» (Саратов, 2014); Всероссийской научной конференции молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" (Новосибирск, 2014, 2016); I Международной научной конференции молодых ученых (Новосибирск, 2014); 21 Всероссийской научно-технической конференции (Томск, 2015); 2 Всероссийской научной конференции с международным участием «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных и жилых

зданий»(Новосибирск, 2015); 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016);

По материалам диссертации опубликовано 13 печатных трудов, в том числе: в рецензируемых журналах 6– (из них по перечню ВАК 2); монографий – 1; свидетельств о регистрации программ для ЭВМ – 1; в сборник научных трудов по материалам конференций –5.

Структура и объем работы: Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 117 наименований и 2 приложений. Общий объем работы составляет 162 страницы и содержит 57 рисунков и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая формулировка проблемы использования тонкодисперсной водоугольной суспензии в циклонных предтопках в котлоагрегатах ТЭС. Кратко изложено содержание работы.

В первой главе изложены предпосылки к использованию тонкодисперсной водоугольной суспензии (ТД ВУС) в энергетических установках. Представлено историческое развитие технологии ТД ВУС. Показано, что заметный вклад в развитие технологии внесен отечественными предприятиями и организациями, а именно ИТ СО РАН, СибВТИ, ИГИ, НОТЭП, ЗАО НПП «Сибэкотехника», НПО «Росток», ЗАО «ЗиО-КОТЭС-наука», НГТУ, КОМПОМАШ-ТЭК, а также учеными и исследователями Овчинниковым Ю.В., Бурдуковым А.П., Мурко В.И., Луценко С.В., Хренковой Т.М., Делягиным Г.Н., Цепенком А.И., Саломатовым В.В. и др. Обращено внимание и на зарубежные работы в области водоугольного топлива.

В главе отмечены экологические преимущества ТД ВУС и показаны проблемы ее сжигания, которые заключаются в отсутствии методического инструментария по разработке и созданию аппаратов в виде циклонных предтопок и отсутствии надежной системы воспламенения. Отмечено, что данные факторы являются сдерживающими развитие технологии сжигания ТД ВУС в топках котлов. Это подтверждают изученные методы, выполненные в разные годы Институтом теплофизики СО РАН, Мурко В.И., Цепенком А.И. и др. в которых отмечены преимущества и недостатки используемых агрегатов и методов исследования. Показано, что использованные ранее методики, не приводят к получению стандартизированной конструкции.

Сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе представлена математическая модель процесса воспламенения и горения ТД ВУС, разработан метод конструкторского расчета циклонного предтопка в инженерной постановке и проведен анализ влияния характеристик горения на конструкцию аппарата.

Все разработанные методы имеют инженерную направленность, что обуславливает приближенность моделирования, которая выражается следующими допущениями: квазистационарность процесса; постоянство теплоемкостей и коэффициентов теплоотдачи, значения которых соответствуют средней температуре процесса; изотермичность частиц топлива; однофазность газозвеси; инертность компонентов золы; учет определенных химических реакций взаимодействия с окислителем, одномерность потока.

Термическим сопротивлением частиц топлива можно пренебречь, так как значение критерия Фурье $Fo > 5$ и одновременно критерий Био $Bi < 0,5$. Конвективно-кондуктивный теплообмен от газа к частице превалирует над переносом теплоты радиацией, поэтому лучистая составляющая процесса может не учитываться, либо учитываться приближенно.

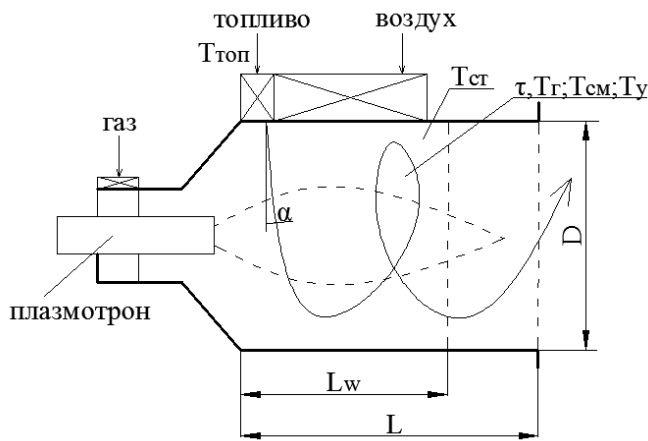


Рисунок 1 - Схема движения топлива в циклонном предтопке

Такой переход позволяет провести анализ процесса и получить конечные выражения, пригодные для инженерных расчетов.

Движение топлива в виде ТД ВУС внутри циклонного предтопка (ЦП) характеризуется физическими свойствами и размером частички топлива (δ), конструктивными параметрами циклона (L_w, L, D, α), временем

нахождения частички в реакторной зоне (τ) и температурами стенки ($T_{ст}$), газов (T_g), смеси ($T_{см}$), частицы (T_p), а также исходной температурой топлива ($T_{топ}$), Рисунок 1.

Полагая, что топливо движется внутри некоторого канала, который, в свою очередь, закручен по образующей предтопка, уравнение изменения температуры газов можно представить в виде

$$\frac{dT_g}{d\tau} = -A_g T_g + F_g. \quad (1)$$

В этом уравнении

$$A_g = \psi_y \frac{1}{V_{см} c_{см}} \left(\frac{Nu \lambda}{d_{тр}} + \alpha_p \right) = 3BiFo\sigma^{-1} \left(1 + \frac{\alpha_p \psi_y}{3BiFoc_y \tau^{-1}} \right); \quad (2)$$

$$F_g = \psi_y \frac{1}{V_{см} c_{см}} \left(\frac{Nu \lambda}{d_{тр}} T_y + \alpha_p T_{ст} \right) = 3BiFo\sigma^{-1} \frac{c_y}{V_{см} c_{см}} T_{ст} \left(\frac{T_y}{T_{ст}} + \frac{\alpha_p \psi}{3BiFoc_y \tau^{-1}} \right), \quad (3)$$

где $T_{ст}$, T_y - температура станки и частиц топлива; α_p - радиационный коэффициент теплоотдачи; $\psi_y = \frac{6}{\delta \rho_y}$ - поверхность частиц на 1 кг топлива; $d_{тр}$ - диаметр канала; ρ_y - плотность угольных частиц.

После интегрирования

$$T_{\Gamma} = T_{см} \exp\left(-3BiF_0\tau^{-1} \frac{c_y}{V_{см}c_{см}}\right) + T_{ст} \left[1 - \exp\left(-3BiF_0\tau^{-1} \frac{c_y}{V_{см}c_{см}}\right)\right], \quad (4)$$

где c_y , $c_{см}$ - теплоемкость частиц топлива и газовзвеси.

Процесс испарения влаги из капли топлива представлен как

$$\begin{aligned} \frac{dm_B}{d} &= \frac{d}{d\tau_w} \left(\frac{\pi\delta^3}{6} \rho_y \frac{w}{1-w} \right) = \frac{\pi\delta^3}{6} \rho_y \frac{1}{(1-w)^2} \frac{dw}{d\tau_w} = \\ &= -\pi\lambda\delta_w \frac{T_{см} - T_{топ}}{r} Nu, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\delta_w = \sqrt[3]{\delta^3 \frac{\rho_y}{\rho_w} \frac{w}{1-w}} = 1,25\delta \left(\frac{w}{1-w}\right)^{0,33}$.

Из этого следует, что

$$\frac{dm_B}{d\tau_w} = -1,25 \frac{\Psi_y}{r} \alpha (T_{см} - T_{топ}) (1-w)^{1,67} w^{0,33}, \quad (6)$$

где α - коэффициент теплоотдачи; r - теплота испарения; τ_w - время испарения влаги. В этом процессе важно определить время окончания процесса испарения для всего количества полностью испарившейся влаги из топлива, так как только после этого начинается прогрев частиц.

Принимая во внимание, что dm_B характеризуется исходной влажностью топлива (w), решение уравнения (6) имеет вид

$$w = 1,25 \frac{\Psi_y}{\delta \cdot r} \lambda Nu (T_{см} - T_{топ}) (1-w_0)^{1,67} w_0^{0,33} \tau_w, \quad (7)$$

где w_0 - начальное значение относительного содержания влаги в топливе.

Таким образом, полное время термохимических превращений топлива будет определяться суммой $\tau_{\Sigma} = \tau + \tau_w$.

Уравнение для изменения температуры частицы топлива во времени, учитывающее конвективно-кондуктивный механизм переноса теплоты в газовзвеси, тепловые эффекты $\sum Q_i f_i$ термохимических реакций (в том числе и при выделении летучих), с учетом принятого методического подхода имеет вид:

$$\frac{dT_y}{d\tau} = -A_y T_y + F_y. \quad (8)$$

В этом выражении

$$A_y = \psi_y \frac{Nu\lambda}{c_y d_{тр}} = 3BiF_0 \tau^{-1};$$

$$F_y = \psi_y \frac{Nu\lambda}{d_{\text{тр}}} T_r + \frac{1}{c_y} \sum Q_i f_i = 3BiFo\tau^{-1} T_r \left(1 + \frac{1}{3BiFoc_y T_r \tau^{-1}} \sum Q_i f_i \right).$$

После интегрирования получим

$$T_y = T_{\text{см}} e^{-3BiFo} + T_r \left(1 + \frac{1}{3BiFoc_y T_r \tau^{-1}} \sum Q_i f_i \right) (1 - e^{-3BiFo}), \quad (9)$$

где начальная температура частиц принята на уровне $T_{\text{см}}$.

При термохимических реакциях уравнение выхода компонентов (CH_4 , CO_2 , CO , H_2 , H_2O) можно представить как

$$\frac{dC_j}{d\tau} = (C_j^0 - C_j) a_j = f_j, \quad (10)$$

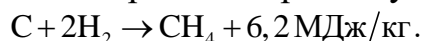
где $a_j = K_j \exp(-E_j R^{-1} T_y^{-1})$, K_j , E_j - предэкспоненциальный множитель, константа скорости выхода компонентов и соответствующая энергия активации в j -ой термохимической реакции; R - универсальная газовая постоянная; C_j^0 - начальная концентрация компонентов.

Из выражения (10) следует

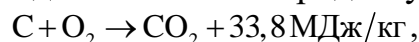
$$C_j = C_j^0 (1 - e^{-a_j \tau}). \quad (11)$$

С другой стороны, для получения математической модели с приемлемой для инженерных расчетов точностью достаточно учитывать определяющие процессы пиролиза и горения реакции. Эти реакции показаны ниже.

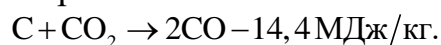
Выход летучего метана определяется взаимодействием углерода угля с освободившимся в результате нагрева водородом угля:



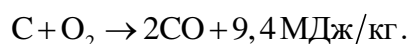
Выход летучей двуокиси углерода определяется горением углерода при взаимодействии с освободившимся кислородом угля:



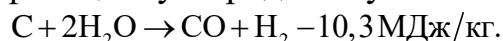
и в дальнейшем процессом затратами CO_2 на частичную углекислотную газификацию углерода с образованием CO :



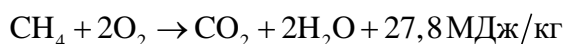
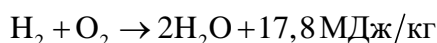
Кроме того, выход летучей окиси углерода определяется окислением углерода угля кислородом, с учетом предыдущих затрат кислорода на реакцию горения:



Также, следует учитывать испарение влаги и, в связи с этим, частичную паровую газификацию углерода полукоксом:



Горение образовавшихся CO , H_2 и CH_4 обусловлено наличием кислорода в первичном и вторичном (при необходимости) воздухе и проходит по реакциям



Кинетические параметры реакций представлены в Таблице 1.

Таблица 1 - Кинетические параметры реакции

Реакции		$k_0, \text{с}^{-1}$	$E, \text{кДж/кмоль}$
Выход влаги из топлива	$\text{H}_2\text{O}^{\text{топл}} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	8×10^{13}	215×10^3
Выход топливного СО	$\text{CO}^{\text{топл}} \rightarrow \text{CO}$	2×10^{12}	186×10^3
Выход топливного CO_2	$\text{CO}_2^{\text{топл}} \rightarrow \text{CO}_2$	2×10^{11}	137×10^3
Выход метана из топлива	$\text{CH}_4^{\text{топл}} \rightarrow \text{CH}_4$	$1,6 \times 10^{14}$	216×10^3
Паровая газификация полукокса	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	2×10^{11}	255×10^3
Углекислая газификация полукокса	$\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$	3×10^3	350×10^3
Горение угля		$1,35 \times 10^{18}$	84×10^3
Горение CH_4			125×10^3



Рисунок - 2 Алгоритм инженерных расчетов ЦП

Алгоритм расчетов можно представить следующим образом – сначала определяют кинетические характеристики процессов испарения влаги из ТД ВУС при движении в предтопке в виде некоторой струи, закрученной по образующей циклона так, чтобы фронт пламени с линейной скоростью двигался в сторону топочного пространства. Затем определяют температуры топливных частиц и смеси продуктов сгорания. На последнем этапе расчетов определяют конструктивные характеристики циклонного предтопка (Рисунок 2).

Таким образом, представлена приближенная физическая модель процесса воспламенения и горения ТД ВУС. При этом сначала, по мере движения топлива в среде окислителя (воздуха) происходит испарение влаги, а затем, воспламенение и горение топливных частиц и продуктов пиролиза. Фактически циклонный предтопок разбит на две части –

зону испарения (характеризуется L_w) и зону воспламенения и горения (характеризуется L), Рисунок 1.

Для определения конструктивных характеристик находят время выхода влаги, с

$$\tau_w = \frac{W^p}{1,25 \cdot w_{\text{внт.}} \cdot \frac{6}{\rho_{\text{ч}} \cdot \delta} \cdot \alpha \cdot \frac{T_{\text{ст}} - T_{\text{топ}}}{h_{\text{п}}} \cdot (1 - W^p)^{1,67} \cdot (W^p)^{0,33}}. \quad (12)$$

Затем длину участка испарения, м

$$L_w = \frac{V_{\text{п}} \cdot G}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2} \cdot \tau_w, \quad (13)$$

и полную длину предтопка с учетом крутки потока

$$L = 2 \cdot d \cdot \frac{\ell_{\text{гор}} \cdot \omega_{\text{см}} \cdot \tau + \frac{V_{\text{п}} \cdot G}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2} \cdot \tau_w}{\pi \cdot D \cdot \left[\frac{\sqrt{(D \cdot \text{tg} \alpha)^2 + D^2}}{D} \right]} \quad (14)$$

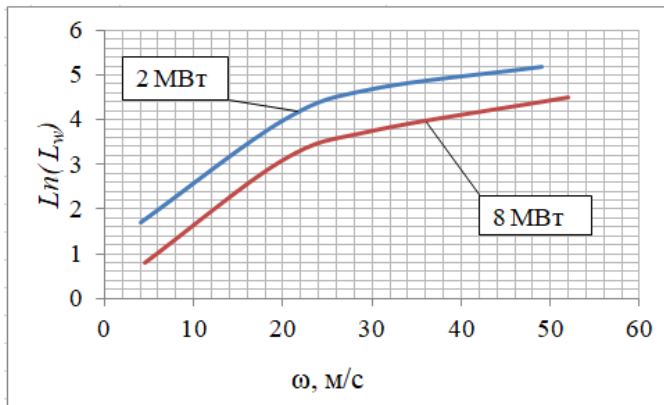


Рисунок - 3 Зависимость длины участка от скорости потока

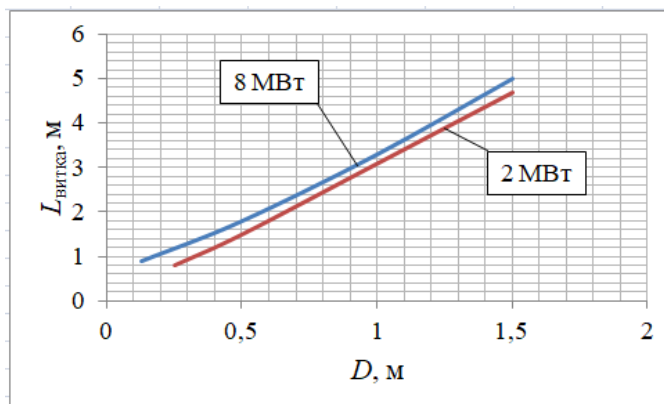


Рисунок 4 - Влияние мощности предтопка на его размеры при $\omega_{\text{см}} = 20 \text{ м/с}$ и $\alpha = 6-17^\circ$

В этих выражениях

W^p - влажность топлива; $w_{\text{внт.}}$ - поправка на скорость витания частиц; $\rho_{\text{ч}}$ - плотность частицы, кг/м^3 ; δ - характерный размер частицы; α - угол ввода потока; $T_{\text{ст}}$ - температура стенки, К; $T_{\text{топ}}$ - начальная температура топлива, К; $h_{\text{п}}$ - энтальпия пара, кДж/кг ; $V_{\text{п}}$ - объем пара в продуктах сгорания, $\text{м}^3/\text{кг}$; G - расход пара, кг/с ; d - диаметр трубчатой зоны (канала) горения, м; $\ell_{\text{гор}}$ - поправка на длину факела при горении ТД ВУС по сравнению с пылеугольным топливом; $\omega_{\text{см}}$ - Скорость смеси (продуктов сгорания) на оси потока, м/с ; τ - характерная длина, м; D - диаметр из условия крутки топки, м; α - угол крутки, $^\circ\text{C}$.

По времени испарения находят длину участка испарения.

На основании результатов расчетов получены зависимости выхода газообразных продуктов пиролиза и горения ТД ВУС. Отмечена адекватность модели в сравнении с экспериментальными данными других авторов. Установлено, что за счет полного выгорания водорода в топливе на начальном участке процесса (0-1 с) обеспечивается высокая температура смеси ($T_{см}$) до 1800-2500 К. Время выхода влаги для

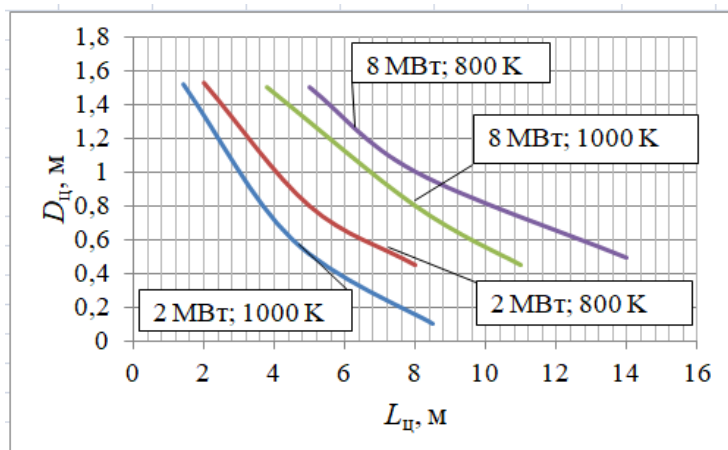


Рисунок 5 - Линейные размеры циклона в зависимости от мощности и температуры реакции при $\omega_{см} = 20 м/с$

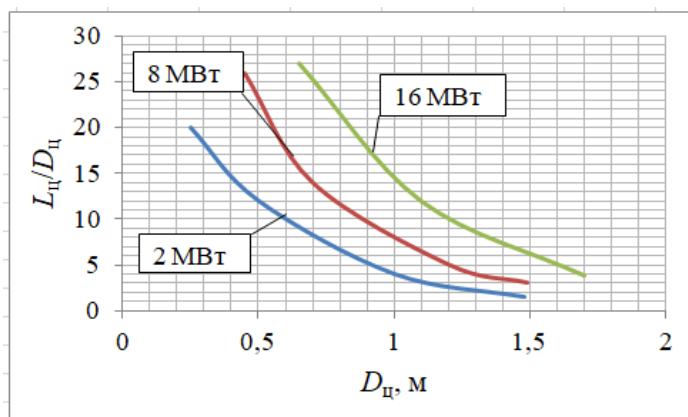


Рисунок 6 - Конструктивные характеристики предтопка в зависимости от его мощности и соотношения его длины (L) к диаметру (D) ($\alpha=6-17^\circ$)

Можно видеть, что влияние температуры менее заметно, чем влияние мощности на линейные размеры предтопка. Если принять диаметр циклона (D) на уровне 1-1,5 м (что соответствует, например, диаметрам амбразур энергетических котлов) при тепловой мощности 8-16 МВт, то длина аппаратов составляет 4,5-10 м, Рисунок 6.

Третья глава посвящена разработке метода использования плазменной технологии для воспламенения ТД ВУС. В нем

теплонапряженных предтопок ($T_{ст} = 750-1000 К$) составляет менее 2 с, а для охлаждаемых ($T_{ст} = 500-700 К$) может доходить до 5 с.

Характерный участок испарения в зависимости от скорости потока ($\omega_{см}$) может составлять 2,5-200 м, Рисунок 3. При этом на длину участка испарения оказывает влияние мощность предтопка, так для мощностей предтопок в 2 и 8 МВт L_w в 2,3-2,4 раза меньше у более мощного предтопка, Рисунок 3. Показано, что длина витка внутри циклона практически не зависит от его мощности, Рисунок 4.

Собственно предтопок может

быть выполнен при разных соотношениях его длины (L)

сформулированы требования, предъявляемые к системе зажигания ТД ВУС. Показано, что теплонапряжение объема ЦП должно составлять 3,5-4 МВт/м³, а теплонапряжение его сечения – 8,5-9,5 МВт/м². Длина ЦП для надежного воспламенения топлива должна быть в 1,5-1,7 больше его диаметра, при этом для мощностей ЦП до 12 МВ диаметр следует определять по теплонапряжению объема, а свыше 12 МВт – по теплонапряжению сечения.

Мощность, которую необходимо подвести к плазмотрону, определяют по выражению

$$N_{\text{пл}} = \frac{Q_{\Sigma}}{\eta_{\text{пл}}}, \quad (15)$$

где Q_{Σ} , МВт – теплота, затрачиваемая на испарение влаги в ЦП и на воспламенение твердой фазы; $\eta_{\text{пл}}$ - КПД плазмотрона.

Показано, что при мощности предтопка на уровне ~15 МВт, мощность плазмотрона составит 21 кВт, а мощность плазмотрона для водогрейного котла ДКВр-20-13, при условии его работы на ТД ВУС составит ~1,5 МВт.

В четвертой главе представлен метод корректировки данных для контроля над процессом сжигания ТД ВУС. В основе метода лежит согласование балансовых уравнений методом случайно-направленного поиска при наличии граничных условий.

Для нахождения истинных значений (x_i^*, y_i^*) балансового уравнения вида

$$f[X_R^*, Y_R^{*(\lambda)}] = \min f[X_R, Y_R^{*(\lambda-1)}], \{X_R, Y_R^{*(\lambda-1)}\} \in G \quad (16)$$

при помощи генератора случайных чисел формируется процедура отыскания x_i^* и y_i^* , алгоритм которой показан на рис.7.

В выражении (16) X, Y – множества зависимых и независимых параметров согласования; R – вещественное пространство; G – непустая область, определяемая ограничениями вида $x^{(*)} \leq x \leq x^{(**)}$ и $y^{(*)} \leq y \leq y^{(**)}$; λ - показатель итерации процесса. Алгоритм метода представлен на Рисунке 7.

Показано, что применение метода уточняет результирующие данные по массовому составу выхода продуктов сгорания ТД ВУС с величиной небаланса <1%.

В пятой главе проведено сравнение эффективности плазменного воспламенения ТД ВУС с жидкостным. Для этого разработан метод, в основе которого лежит затратный механизм, учитывающий капитальную и переменную составляющую в каждый из способов организации растопки ЦП. Показано, что плазменная растопка по сравнению с жидкостной становится предпочтительнее через 10 пусков.

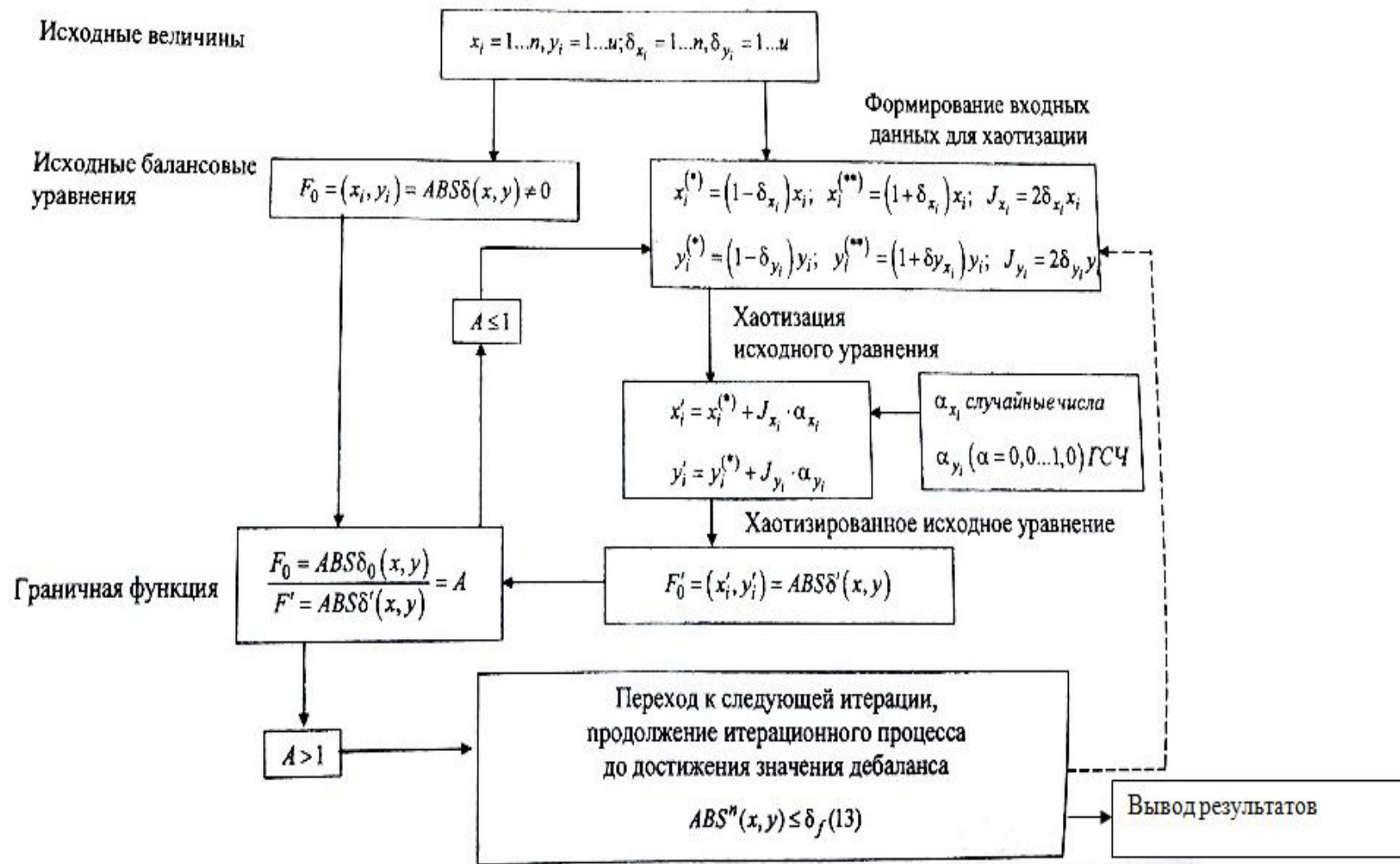


Рисунок 7 - Схема и алгоритм согласования балансового уравнения методом случайно-направленного поиска с применением граничных условий

Заключение

1. Разработана кинетическая модель пиролиза, воспламенения и горения тонкодисперсной водоугольной суспензии с учетом основных химических реакций. Работоспособность (достоверность) модели подтверждена сравнением с известными экспериментальными данными.
2. В результате моделирования пиролиза, воспламенения и горения ТД ВУС установлено, что на начальном этапе процесса (0-1 с) температура смеси ($T_{см}$) достигает значений 1800-2500 К с последующим снижением до ~ 1200 К. Высокая температура на начальном участке обусловлена полным выгоранием водорода топлива.
3. Установлено, что для ТД ВУС на основе кузнецкого угля с содержанием влаги 40 % время выхода влаги составляет 1-5 с в зависимости от температуры стенки предтопка, меняющейся от 500 до 1000 К. Меньшие значения τ_w характеризуют высоконапряженные предтопки, а большие – охлаждаемые.
4. Разработан метод конструкторского расчета циклонного предтопка в инженерной постановке. При этом выявлено, что при технически реализуемых скоростях $\omega > 20$ м/с, обеспечивающих надежную крутку потока, на конструктивные характеристики в общем случае будут влиять тепловая мощность (Q) предтопка, температура ($T_{ст}$) стенки и угол (α) ввода потока.
5. Показано, что при углах $\alpha = 6-17^\circ$ тепловая мощность предтопка не влияет на характеристику крутки потока.
6. Показано, что на линейные размеры предтопка оказывает влияние его тепловая мощность, а не температуры протекающих процессов.
7. Показано, что для диаметров циклонов $D_{ц} = 1,0-1,5$ м, характерных, например, для амбразур энергетических котлов, при тепловой мощности 8-16 МВт, длина аппаратов составляет $L_{ц} = 4,5-10$ м. Длина участка испарения L_w , в этом случае, составит 0,4-0,55 от полной длины, при этом с ростом мощности аппарата влияние температуры процессов на L_w снижается.
8. Предложен метод расчета мощности плазмотрона, который учитывает деление предтопка на зоны и количество теплоты, которое необходимо подвести в каждую из них для испарения влаги и воспламенения ТД ВУС.

9. Показано, что при мощности предтопка на уровне ~15 МВт мощность плазмотрона составит 21 кВт. Этот показатель в ~60 раз меньше, чем при розжиге растопочным или резервным топливом. Показано, что для котла ДКВр-20-13, работающего на ТД ВУС на основе Междуреченского угля марки Д, мощность плазмотрона составила ~1,2 МВт.
10. Разработанный метод случайно-направленного поиска с применением граничных условий, позволяющий сократить небаланс измеренных на функционирующих энергоагрегатах входных параметров с ~ 1,06% до 0,07 %.
11. Экономическая эффективность плазменной растопки по сравнению с жидкостной обеспечивается через 10 пусков.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

Статьи в журналах по перечню ВАК:

1. Елистратов, С.Л., Овчинников, Ю.В., Шаров, Ю.И., Бойко, Е.Е. Сравнительное исследование снижения информационной неопределенности функционирующих энергоустановок на основе аналитической методики и метода случайного поиска [Электронный ресурс]/ С. Л. Елистратов, Ю. В. Овчинников, Ю. И. Шаров, Е. Е. Бойко// Новое в российской электроэнергетике: науч.-техн. электрон. журн.. - 2017.- № 12. - С. 6-22. - Режим доступа: <http://www.energo-press.info/nre>.
2. Овчинников, Ю.В., Елистратов, С.Л., Францева, А.А., Бойко, Е.Е. Коррекция исходной информации в балансовых уравнениях методом случайного поиска при наличии граничной функции/ Ю. В. Овчинников, С. Л. Елистратов, А. А. Францева, Е. Е. Бойко // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2017. - № 3 (68). - С. 62-75

Публикации в рецензируемых журналах:

3. Овчинников, Ю.В., Бойко, Е.Е., Серант, Ф.А. Проблемы сжигания водоугольных топлив и предложения по разработке технологии сжигания / Ю. В. Овчинников, Е. Е. Бойко, Ф. А. Серант// Доклады АН ВШ Российской Федерации. - 2015. - № 1(26) - С. 85-93
4. Boyko, E.E., Ovchinnikov, Y.V. Research of spraying, ignite and incineration ACLF in the boiler with cyclone furnace extension / E.E. Boyko, Y.V. Ovchinnikov // Applied Mechanics and Materials. - 2015. – Vol. 698 : Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. – P. 664-667. - Режим доступа: www.scientific.net/AMM.698.664.
5. Ovchinnikov, Y.V., Nozdrenko, G.V., Boyko, E.E., Mikhailenko, A.I. Methods of balance matching to refine the initial information as applied to thermal power plant / Y. V. Ovchinnikov, G. F. Nozdrenko, E. E. Boyko, A. I. Mikhailenko// 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016) : proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk : NSTU, 2016. – Pt. 2. – P. 218-221
6. Бойко, Е.Е., Овчинников, Ю.В., Григорьева, О.К. Коррекция исходной информации для расчета эффективности функционирующей энергоустановки при сжигании ВУТ = Korrektsiya iskhodnoi informatsii dlya rascheta effektivnosti funktsioniruyushchei energoustanovki pri szhiganii VUT [Correction of the initial information for calculation of efficiency of functioning energy unit when burning water-coal fuel /Е.Е. Бойко, Ю.В.

Овчинников, О.К. Григорьева// Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2017. – № 3 (36). – С. 19–28.

Монографии

7. Овчинников, Ю. В. Технология получения и исследования тонкодисперсных водоугольных суспензий : монография / Ю. В. Овчинников, Е. Е. Бойко. - Новосибирск: НГТУ, 2017. - 308 с.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

8. Овчинников, Ю.В., Михайленко, А.И., Бойко, Е.Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016612293 «Balance F&G» 20 февраля 2016 г.

Другие публикации:

9. Бойко, Е.Е., Ю.В. Овчинников Результаты исследований распыливания, воспламенения и сжигания ИКЖТ в котлоагрегате с циклонным предтопком/ Е.Е. Бойко, Ю.В. Овчинников // Проблемы теплоэнергетики: Сборник научных трудов по материалам 12 междунар. науч.-технич. конф.– Саратов: СГТУ, 2014. – Вып. 3. – С. 250-253.
10. Бойко, Е.Е. Распыливание ИКЖТ пневматическими форсунками / Е.Е. Бойко // Новосибирск: НГТУ, 2014. – Часть 5. – С. 10-14.
11. Бойко, Е.Е., Овчинников Ю.В. Исследование распыливания, воспламенения и сжигания ИКЖТ в котлоагрегате с циклонным предтопком./ Е.Е. Бойко, Ю.В. Овчинников// Сборник научных трудов I Международной конференции молодых ученых. - Новосибирск: НГТУ, 2014. - Кн.2. - С.206-209.
12. Бойко, Е.Е., Овчинников, Ю.В. Разработка методики управления воспламенением водоугольного топлива в циклонном предтопке. / Е.Е. Бойко, Ю. В. Овчинников// Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: Материалы 21 Всерос. науч.-техн. конф. - Томск: Скан, 2015. – Т.1. – С.211-214.
13. Овчинников, Ю. В., Бойко, Е.Е. Оценка методов сжигания водоугольного топлива – искусственного композиционного жидкого топлива и предложения по разработке технологии сжигания / Ю. В. Овчинников, Е. Е. Бойко// Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных и жилых зданий: материалы 2 Всерос. науч. конф. с междунар. участием.- Новосибирск, 24-26 марта 2015 г. - Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2015. - С.312-317.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

тел./факс (383) 346-08-57

формат 60 × 86/16, объем 1.0 п.л., тираж 100 экз.

заказ №1342 подписано в печать 05.10.18