



Сыродой Семен Владимирович

**ТЕРМИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА И ЗАЖИГАНИЕ ЧАСТИЦ
ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТОПКАМ
КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ**

05.14.14–Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты
01.04.14–Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Теоретической и промышленной теплотехники» Энергетического института ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научные руководители: Доктор физико-математических наук, профессор, **Кузнецов Гений Владимирович.**
Доктор технических наук, профессор, **Саломатов Владимир Васильевич.**

Официальные оппоненты: **Пузырев Евгений Михайлович**, Доктор технических наук, доцент кафедры котло- и реакторостроения, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (г. Барнаул)

Крайнов Алексей Юрьевич, Доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математической физики, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (г. Томск)

Ведущая организация: Закрытое акционерное общество «Котельное оборудование тепловых электрических станций» (ЗАО «КОТЭС» г.Новосибирск).

Защита состоится «26» декабря 2014 г. в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в аудитории №217 учебного корпуса №8 по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национального исследовательского Томского политехнического университета» и на сайте <http://portal.tpu.ru: /council/2803/worklist>.

Автореферат разослан «29» октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.269.13
кандидат технических наук, доцент



А.С. Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Интерес к угольной энергетике, стимулируется в связи с пересмотром приоритетов в энергетической политике страны (новая «угольная волна»). Но, высокая антропогенность традиционных способов сжигания такого топлива тормозит его широкое внедрение в топливно-энергетический баланс страны. Одним из наиболее перспективных технологических решений по оптимизации процессов сжигания угля на ТЭС является водоугольное топливо (ВУТ). В общем случае ВУТ представляет собой сложную гетерогенную структуру, состоящую из мелко диспергированного угля и воды, с добавлением различных присадок и пластификаторов, сохраняющих твердые частицы во взвешенном состоянии. До настоящего времени практически отсутствуют научные основы проектирования топочных устройств котельных агрегатов ТЭС и камер сгорания ГТУ, работающих на водоугольном топливе. Это связано с особенностью моделирования процесса горения большой совокупности частиц (необходимо знание закономерностей горения хотя бы одной частицы, которая впоследствии считается типичной).

Достаточно хорошо проработана теория горения угольных частиц, что отражено в работах Гремячкина В.М., Сполдинга Д.Б., Померанцева В.В., Предводителя А.С., Хитрина Л.Н., Бабия В.И., Вулиса Л.А., Головиной Е.С. Но опубликовано сравнительно мало результатов исследований сжигания водоугольных суспензий (Деягин В.И., Бабий В.И., Саломатов В.В., Бурдуков А.П., Мурко В.И., Пузырев Е.М). Известные математические модели зажигания частиц ВУТ сформулированы с рядом, существенно упрощающих постановку задач, допущений. В частности предполагается, что процесс зажигания можно представить в виде последовательных взаимосвязанных стадий. Такой подход позволяет рассматривать каждую стадию как отдельную задачу и находить относительно простые приближенные решения. В тоже время достаточно очевидно, что представление о раздельности процессов, предшествующих зажиганию, применимо только для очень мелких частиц (с характерными размерами менее 100мкм). При зажигании более крупных частиц большую роль может внести совместность всего комплекса физико-химических процессов, предшествующих воспламенению (инертный прогрев, испарение, фильтрация водяных паров, термическая деструкция угля, зажигание и горение летучих, зажигание и горение углерода кокса).

Создание математических моделей и анализ основных процессов тепло- и массопереноса при зажигании частиц ВУТ представляют собой актуальные, не решенные до настоящего времени задачи.

Цель исследования – разработка математической модели и анализ основных закономерностей процессов тепломассопереноса при зажигании частиц водоугольного топлива в условиях, соответствующих топочному пространству котельного агрегата, при учете совместного протекания основных стадий процесса воспламенения: кондуктивно- конвективный теплоперенос, испарение влаги, термическое разложение органической компоненты топлива, выход и зажигание летучих.

Задачи исследования:

- 1) Разработка математической модели процессов тепло- и массопереноса при зажигании частиц ВУТ.
- 2) Установление зависимостей основного параметра (время задержки воспламенения частицы ВУТ) от температуры внешней среды (продукты сгорания, экранные поверхности топочной камеры) и размеров частицы;
- 3) Анализ влияния экзотермических эффектов испарения влаги, термического разложения органической части топлива, химического взаимодействия углерода кокса и водяных паров; изменения теплофизических свойств углей с ростом температуры; формы частицы; излучения внешней среды; свойств угля на условия и характеристики зажигания.

Научная новизна работы: Впервые сформулирована и решена задача тепломассопереноса при зажигании частицы водоугольного топлива в рамках математической модели, учитывающей совместность протекания основных процессов (инертный прогрев, испарение влаги, термическое разложение органической компоненты топлива, фильтрационный тепло- и массоперенос, химическое взаимодействие углерода кокса и водяного пара, выход летучих горючих компонентов и продуктов взаимодействия водяного пара с углеродом) термической подготовки к воспламенению. Решенная в диссертации задача не имеет аналогов по постановке, методу решения и полученным результатам. Автором диссертации выполнено математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса при воспламенении водоугольных частиц различного диаметра в широком диапазоне изменений условий теплообмена (температура внешней среды и интенсивность теплообмена).

Практическая значимость результатов работы заключается в создании математической модели и метода численного решения задачи зажигания частицы водоугольного топлива. Полученные результаты исследований создают объективные предпосылки для обоснования конструктивных характеристик и компоновок топочных устройств котельных агрегатов ТЭС, схем подготовки топлива с целью повышения эффективности его сжигания. Результаты исследований внедрены в виде методических указаний по переводу котельных агрегатов на сжигание водоугольного топлива и проектированию схем топливоподготовки и топливоподдачи.

Достоверность результатов работы обеспечивается проверкой консервативности разностной схемы. Тестирование выбранных численных

методов и разработанного алгоритма решения основной задачи выполнено на ряде менее сложных нестационарных, нелинейных задач теплопроводности. Проведено сравнение полученных результатов с ранее опубликованными экспериментальными данными других авторов.

Автор защищает: постановку задачи, результаты теоретических исследований закономерностей процессов тепломассопереноса при зажигании частиц водоугольного топлива в условиях, соответствующих топочному пространству котельных агрегатов, в рамках модели, учитывающей совместное протекание процессов испарения, фильтрации водяного пара через пористую структуру, химическое взаимодействие пара и углеродистого остатка, термическую деструкцию органической части, выход летучих, диффузию горючих компонентов и их воспламенение.

Личный вклад автора. Состоит в постановке задачи зажигания частиц водоугольного топлива в условиях, соответствующих топочному пространству котельных агрегатов ТЭС; выборе метода и разработке алгоритма решения; проведении теоретических исследований влияния различных факторов на процесс воспламенения; обобщении результатов выполненных исследований.

Апробация работы. Основные материалы и результаты исследований докладывались и обсуждались на всероссийской молодежной конференции «Горение твердого топлива» (Томск, 2012.), на VIII всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива» (Новосибирск, 2012.), на XIX всероссийской конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (Томск, 2013), на XX международной конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2014), на I Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспектива развития фундаментальных наук» (Томск, 2014), на V Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2014).

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в 12 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков, 7 таблиц, библиография включает 180 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, обоснована практическая значимость и новизна полученных теоретических результатов, представлены защищаемые автором положения.

Первая глава отражает современное состояние теории и практики зажигания частиц водоугольного топлива в условиях, соответствующих топочному пространству котельных агрегатов ТЭС. Проведен анализ немногочисленных работ, посвященных математическому моделированию зажигания частиц ВУТ. Установлено отсутствие результатов теоретического исследования процессов тепло- и массопереноса в условиях зажигания частиц водоугольной суспензии с учетом совместного протекания основных составляющих процесса «термической подготовки» (инертный нагрев, испарение, термическое разложение, фильтрация водяных паров, термохимическое взаимодействие водяных паров и угля) к горению.

Во второй главе представлена постановка задачи тепло- и массопереноса при зажигании частицы водоугольного топлива в условиях, соответствующих топочному пространству котельных агрегатов. Приведено описание используемого численного метода и алгоритма решения задачи. Выполнена оценка достоверности результатов, полученных при решении системы дифференциальных уравнений, описывающих исследуемый процесс.

В качестве основного объекта исследований рассматривается частица

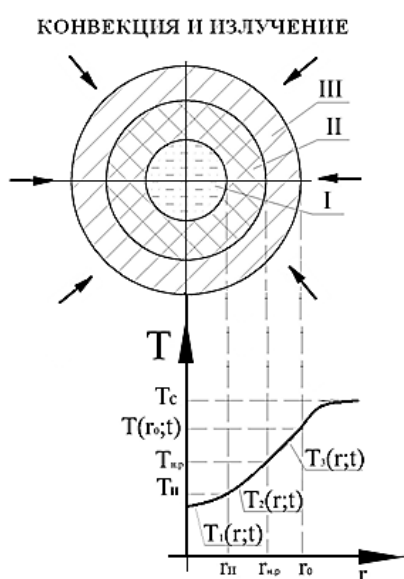


Рисунок. 1 Схема области решения задачи:

- I – зона, соответствующая влагонасыщенному топливу (исходное состояние);
- II – зона «обезвоженного» угля, температура которого меньше T_{np} ;
- III – зона «обезвоженного» угля в стадии термического разложения.
- T_c – температура внешней среды;
- T_{np} – температура начала процесса термического разложения;
- T_i – температура испарения влаги;

водоугольного топлива (рисунок.1). Нагрев поверхности частицы (за счет конвекции и излучения) инициирует процесс испарения влаги. По мере прогрева ВУТ фронт испарения продвигается вглубь частицы. В результате формируется слой пористого сухого топлива, температура в каждой точке которого с течением времени растет. Испарившаяся влага фильтруется через пористый углеродистый каркас. Водяной пар вступает в эндотермическое химическое взаимодействие с углем (после завершения процесса влагоудаления). При достижении на поверхности частицы условия $T_n \geq T_{np}$ (T_n – температура поверхности) начинается разложение органической части топлива с выделением летучих. По мере дальнейшего прогрева и роста температуры фронт ($T(r,t) = T_{np}$) продвигается вглубь топлива. В итоге формируется структура, которую можно условно разделить на три характерные зоны (рисунок.1.): (I) – влагонасыщенное топливо

(исходное состояние); (II) – «обезвоженный» уголь, температура которого меньше $T_{нр}$; (III) – сухой уголь в стадии термического разложения.

Продукты термической деструкции и химического взаимодействия углеродистого твердого остатка и водяных паров вдуваются в «пристенную» область. Формируется газовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критических значений температуры и концентрации (рисунок.1). Период времени от начала теплового воздействия на частицу до начала интенсивного химического взаимодействия парогазовой смеси с окислителем является временем задержки воспламенения.

Сформулированная модель отличается от известных рассмотрением одновременного протекания всех вышеперечисленных процессов «термической подготовки» к зажиганию. Задача решалась в сферической системе координат, начало которой совпадает с центром частицы.

Система нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных для системы «частица ВУТ – высокотемпературная среда» (рисунок .1), соответствующая выше сформулированной физической модели, имеет следующий вид:

Уравнение энергии для исходной (влагонасыщенной) части топлива:

$$C_1 \rho_1 \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial t} = \lambda_1 \cdot \left[\frac{\partial^2 T_1(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \right]; \quad (1)$$

$$t > 0, \quad 0 < r < r_H, \quad T \leq T_H;$$

Уравнение энергии для «обезвоженной» части ВУТ:

$$C_2(r) \rho_2(r) \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial t} = \lambda_2(r) \cdot \left[\frac{\partial^2 T_2(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r} \right] \pm \sum Q_i \cdot W_i - u_s \cdot C_p \cdot \rho_s \frac{\partial T_2(r, T)}{\partial r}; \quad (2)$$

$$t > 0, \quad r_H < r < r_0, \quad T \geq T_H;$$

Уравнение химической кинетики для органической части топлива:

$$\frac{\partial \eta_2(r, t)}{\partial t} = (1 - \eta_2(r, t)) \cdot k_0 \cdot \exp \left(- \frac{E}{R \cdot T_2(r, t)} \right); \quad (3)$$

$$t > 0, \quad r_H < r < r_0, \quad T \geq T_H;$$

Уравнение фильтрации для водяных паров и газообразных продуктов термического разложения:

$$\frac{m \cdot v \cdot Z}{K_p} \cdot \frac{\partial p(r, t)}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 p(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p(r, t)}{\partial r} \right) \quad (4)$$

$$t > 0, \quad r_H < r < r_0, \quad T \geq T_H;$$

На границе раздела системы «исходный ВУТ – сухой углеродистый агломерат» выполняется граничное условие 4-го рода:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_u-0} - \lambda_2(r) \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_u+0} = Q_u \cdot W_u; \quad (5)$$

$$T_1(r_u, t) = T_2(r_u, t) = T_u$$

Система уравнений (1-5) решалась при следующих краевых условиях и замыкающих соотношениях:

$$0 < r < r_0; T(r, 0) = T_0; p(r, 0) = p_0; \eta(r; 0) = \eta_0;$$

$$-\lambda_2(r_0) \frac{\partial T_2(r_0, t)}{\partial r} = \alpha \cdot [T_c - T_2(r_0, t)] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_c^4 - T_2^4(r_0, t)] + \sum_i Q_i \cdot W_i; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_1(0, t)}{\partial r} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial p(r_H, t)}{\partial r} = -\frac{\nu}{K_p} u_s(r_H, t); \quad (8)$$

$$p(r_0; t) = p_0; \quad (9)$$

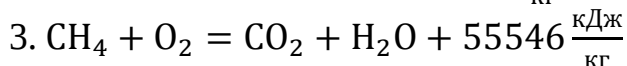
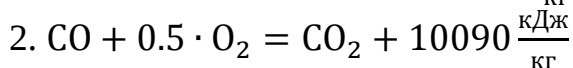
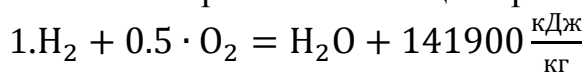
Скорость реакции $C + H_2O = CO + H_2 - 118,485 \text{ МДж}$ вычислялась из следующего выражения:

$$W_i = k_i \cdot c_i \cdot \rho_i \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T(r, t)}\right); \quad (10)$$

Скорость пиролиза рассчитывалась с использованием соотношения:

$$W_i = (1 - \eta(r, t)) \cdot k_i \cdot \rho_i \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T(r, t)}\right); \quad (11)$$

Зажигание водоугольного топлива – гетерогенный процесс, скорость которого определяется кинетикой воспламенения смеси продуктов термического разложения и реакции взаимодействия водяного пара с углеродом. Принято, что вблизи поверхности частицы протекают следующие реакции:



Для определения скоростей этих реакций использовалась зависимость:

$$W_i = k_i \cdot c_i \cdot \rho_i \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T(r_0, t)}\right); \quad (12)$$

Плотность газообразных компонентов (ρ_i) рассчитывалась из уравнения состояния:

$$\rho_i = \frac{p(r, t) \cdot \mu}{T(r, t) \cdot R}; \quad (13)$$

Скорость фильтрации пара через пористую структуру определялась по закону Дарси:

$$u_s = -\frac{K_p}{\nu} \frac{\partial p}{\partial r}. \quad (14)$$

Здесь: T_0 —начальная температура частицы, К; r_H —радиус фронта испарения, м; σ —константа излучения абсолютно черного тела, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$; α —коэффициент конвективной теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; λ_1, λ_2 —коэффициенты теплопроводности

исходной и «обезвоженной» частей ВУТ, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; C_1, C_2 —теплоемкости исходной и сухой частей ВУТ, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; ρ_1, ρ_2 —плотности исходной и сухой частей ВУТ, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $W_{\text{и}}$ —массовая скорость испарения воды, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$; $Q_{\text{и}}$ —тепловой эффект испарения воды, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$; $Q_{\text{и}}$ —тепловой эффект химической реакции, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$; $k_{\text{и}}$ —предэкспонент химической реакции, $\frac{1}{\text{с}}$; $E_{\text{и}}$ —энергия активации химической реакции, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$; $u_{\text{с}}$ —скорость фильтрации водяного пара, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$; $C_{\text{р}}$ —изобарная теплоемкость водяного пара, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $\rho_{\text{с}}$ —плотность пара, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; p —давление парогазовой смеси, Па; m —пористость; Z —степень сжимаемости водяного пара, $\frac{1}{\text{Па}}$; $K_{\text{р}}$ —степень проницаемости пористой структуры, м^2 ; μ —молярная масса водяного пара, $\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$; ν —динамическая вязкость водяных паров, $\text{Па} \cdot \text{с}$; $C_{\text{и}}$ —концентрация соответствующего компонента; i —порядковый номер химической реакции.

Координата границы испарения находилась из выражения:

$$r_{\text{и}} = r_0 - \int_0^{\tau} u_{\text{ф}}(T) \cdot d\tau$$

где $u_{\text{ф}} = \frac{W_{\text{и}}}{\rho_{\text{с}}}$ — линейная скорость продвижения фронта испарения, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Массовая скорость испарения вычислялась из выражения:

$$W_{\text{и}} = W_0 \cdot \exp\left(\frac{Q_{\text{и}} \cdot \mu \cdot (T_{\text{и}} - T_3)}{R \cdot T_3 \cdot T_{\text{и}}}\right) \quad (15)$$

Где: $T_{\text{и}}$ —температура на границе испарения, К; T_3 —температура жидкости, соответствующая точке замерзания, К; W_0 —скорость испарения при температуре T_3 , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$; R —универсальная газовая постоянная, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

Теплофизические свойства влажной и «обезвоженной» части топлива рассчитывались с учетом объемных долей компонент:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \varphi_3 \lambda_3 + \varphi_4 \lambda_4 & C_{\text{р}1} &= \varphi_3 C_{\text{р}3} + \varphi_4 C_{\text{р}4} & \rho_1 &= \varphi_3 \rho_3 + \varphi_4 \rho_4 \\ \lambda_2 &= \varphi_3 \lambda_3 + \varphi_5 \lambda_5 + \varphi_6 \lambda_6 & C_{\text{р}2} &= \varphi_3 C_{\text{р}3} + \varphi_5 C_{\text{р}5} + \varphi_6 C_{\text{р}6} & \rho_2 &= \varphi_3 \rho_3 + \varphi_5 \rho_5 + \varphi_6 \rho_6 \end{aligned}$$

Где φ — объемная доля соответствующего компонента топлива: 3 — вода; 4 — уголь при температуре меньше $T_{\text{нр}}$; 5 — уголь при температуре больше $T_{\text{нр}}$; 6 — воздух.

Система (1)–(15) решена методом конечных разностей. Решение задачи с подвижной границе в условиях испарения воды решено методом «ловли» фронта испарения в узле разностной сетки путем «накопления» временного шага. Оценка достоверности полученных результатов проводилась проверкой консервативности разностной схемы. Так же проведено решение группы тестовых задач зажигания. Выполнено сравнение основных полученных результатов исследования с экспериментальными данными других авторов.

В третьей главе приведены результаты численного моделирования зажигания частиц водоугольного топлива в условиях, соответствующих топочным устройствам котельных агрегатов, с учетом совместного протекания основных

процессов термической подготовке (нагрев, испарение, фильтрационный тепло- и массоперенос, термохимическое взаимодействие водяных паров и углерода кокса, термическое разложение органической части угля с образованием летучих).

Исследования проведены с целью анализа влияния основных процессов и параметров (интенсивность нагрева, испарение воды, термическое разложение, фильтрация водяных паров, зависимость теплофизических свойств от температуры, излучение внешней среды, форма частицы, гетерогенность структуры ВУТ, марка угля) на время задержки зажигания частиц водоугольного топлива.

Проведен численный анализ процесса зажигания частицы водоугольного топлива в условиях, соответствующих

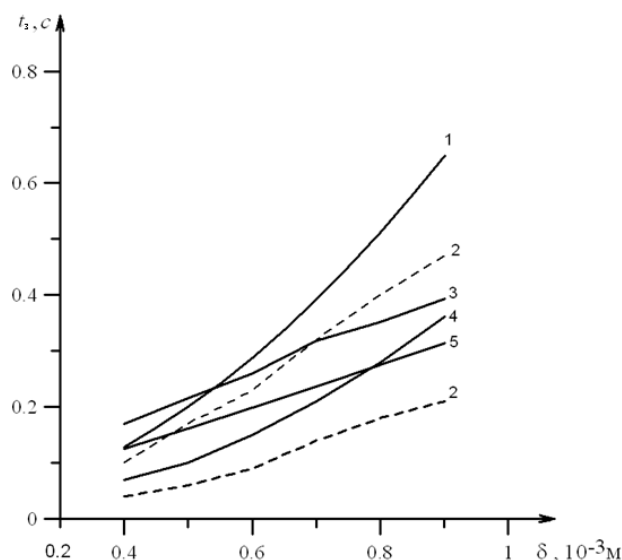


Рисунок.2. Время задержки зажигания:
1 – эмпирические формулы (Бабий В.И);
2 – границы интервала рассеяния экспериментальных данных (Бабий В.И);
3 – численное решение системы (1-15),
4 – эксперимент; 5 – численное решение (1-15) без учета экзотермических эффектов испарения влаги и пиролиза сухой части топлива.

топочным устройствам котельных агрегатов ТЭС. Диаметр частицы варьировался в достаточно широком диапазоне $\delta_0 = 0,4 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-3}$ м. Установлены временные характеристики основных стадий воспламенения. Полученные из численного решения системы (1-15) значения времен задержки воспламенения (t_z) удовлетворительно (рисунок.2) соответствуют эксперименту (Бабий В.И. «Воспламенение и горение капель водоугольной суспензии»). Полученные результаты теоретических исследований, представленные на рисунке.2, свидетельствуют о том, что применение для описания процессов тепломассопереноса в водоугольной частице в типичных условиях топочного пространства упрощенных моделей испарения воды может привести к достаточно большим

отклонениям в определении характеристик зажигания. Показано, что при увеличении диаметра частицы и уменьшении температуры окружающей среды время задержки зажигания возрастает (рисунок 3). Результаты проведенных численных исследований показывают, что зависимость теплофизических свойств от температуры может оказывать существенное влияние на характеристики воспламенения частиц водоугольного топлива при относительно низких температурах внешней среды (менее 950K). При $T_c > 950K$ такое влияние несущественно (рисунок 4). В общем случае можно сделать вывод, что в диапазоне температур ($T_c = 900 \div 1300$ K) внешней среды (которые чаще всего встречаются на практике) различие между временами задержки воспламенения не

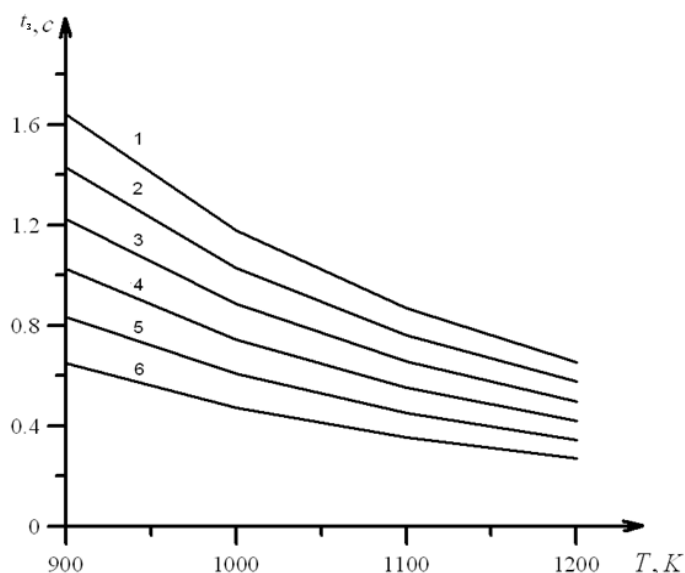


Рисунок.3. Зависимость времени задержки зажигания в различных условиях теплообмена для частиц диаметром:
1– $0,9 \cdot 10^{-3}$ м, 2 – $0,8 \cdot 10^{-3}$ м, 3 – $0,7 \cdot 10^{-3}$ м,
4 – $0,6 \cdot 10^{-3}$ м, 5 – $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, 6 – $0,4 \cdot 10^{-3}$ м,

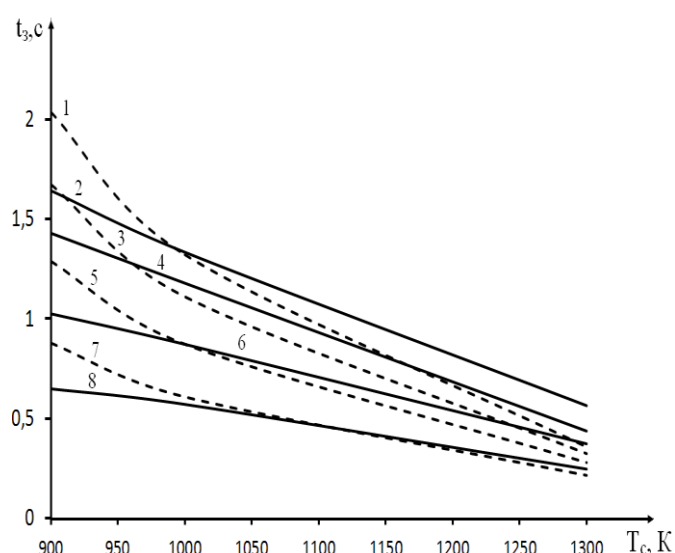


Рисунок 4. Времена задержки воспламенения ВУТ:
1,2 – $1 \cdot 10^{-3}$ мм; 3,4 – $0,8 \cdot 10^{-3}$ мм;
5,6 – $0,6 \cdot 10^{-3}$ мм; 7,8 – $0,4 \cdot 10^{-3}$ мм;
(1;3;5;7)-с учетом зависимости теплофизических свойств от температуры. (2;4;6;8)-без учета зависимости теплофизических свойств от температуры

превышает 30% при различных моделях теплофизических свойств.

На рисунке.5. представлены типичные результаты численных исследований зажигания частиц ВУТ. Хорошо видно, что для каждого характерного размера частицы ВУТ есть предельные по температуре внешней среды условия зажигания. С уменьшением T_c различия в значениях времен задержки зажигания растут. При $T_c=1300$ К значения t_3 для частиц ВУТ диаметром 1 мм и 0,4 мм практически (в пределах погрешностей задания исходных данных) не отличаются. Также можно отметить достаточно значимые отличия времен t_3 частиц ВУТ разного диаметра при идентичных относительно низких температурах внешней среды (рисунок.5). Например, при $T_c=800$ К увеличение диаметра частицы в два раза приводит к аналогичному повышению значений t_3 . Это обусловлено в первую очередь ростом затрат на нагрев и испарение воды в пористой структуре частицы угля.

Одной из важнейших проблем технологии использования ВУТ является выбор концентраций основных компонент (уголь и вода), обеспечивающих технологичность, минимальные затраты на процессы транспорта, хранения, топливоподготовки, полноту сгорания и устойчивое воспламенение.

По результатам численного исследования установлено, что концентрация угольной компоненты в частице топливо может оказывать влияние на скорость воспламенения. В тоже время влияние этого фактора (рисунок.6.) не превышает 5%.

При рассмотрении задач зажигания частиц водоугольного топлива важным можно считать влияние теплового излучения продуктов сгорания топлива и экранов топки. Установлено (Хитрин Л.Н, Померанцева В.В.), что при горении угольных частиц большую роль играет лучистая составляющая теплообмена. При рассмотрении процессов зажигания частиц ВУТ в условиях, соответствующих топочному пространству котельных агрегатов, необходимо учитывать малые значения скоростей витания. Соответственно наибольший эффект в нагрев

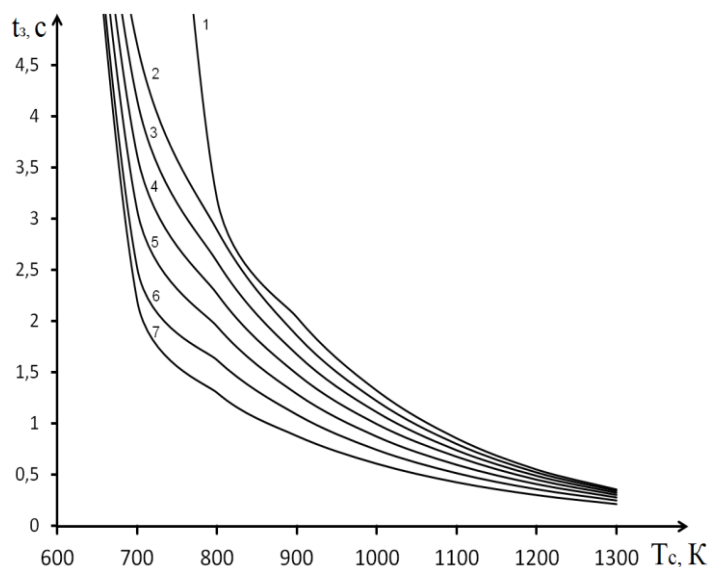


Рисунок .5. Времена задержки воспламенения ВУТ в зависимости от температуры внешней среды для частиц радиусом:

1– $1 \cdot 10^{-3}$ мм; 2– $0,9 \cdot 10^{-3}$ мм; 3– $0,8 \cdot 10^{-3}$ мм;
4– $0,7 \cdot 10^{-3}$ мм; 5– $0,6 \cdot 10^{-3}$ мм;
6– $0,5 \cdot 10^{-3}$ мм; 7– $0,4 \cdot 10^{-3}$ мм;

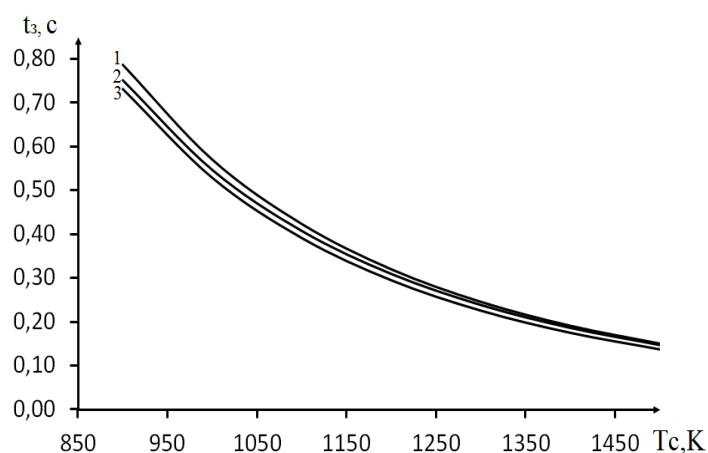


Рисунок 6. Зависимость времени задержки зажигания от температуры внешней среды для частицы диаметром $d=0,4 \cdot 10^{-3}$ м при концентрациях угля:

1– $\varphi_4=0,5$; 2– $\varphi_4=0,8$; 3– $\varphi_4=0,3$;

топлива может вносить излучение внешней среды. Установлено, что радиационная составляющая теплообмена оказывает существенное влияние на характеристики зажигания частиц водоугольного топлива. Так частицы водоугольной суспензии в условиях радиационно-конвективного теплообмена воспламеняются в $2 \div 2,5$ раза, чем такие же частицы при конвективном нагреве (рисунок 7).

Одним из важнейших, но наименее изученных, при моделировании горения частиц ВУТ остается вопрос влияния ее формы на условия и характеристики зажигания. Экспериментально установлено (Мурко В.И. «Результаты исследований распыления водоугольного топлива

пневмомеханическими форсунками»), что при формировании водоугольной суспензии образуются частицы различной геометрической формы. Как правило, все они представляют собой насыщенные влагой неправильные многогранники, число и размер граней которых изменяется случайным образом. По результатам численных экспериментов установлено, что одну из определяющих ролей в процессе воспламенения водоугольных топлив играет

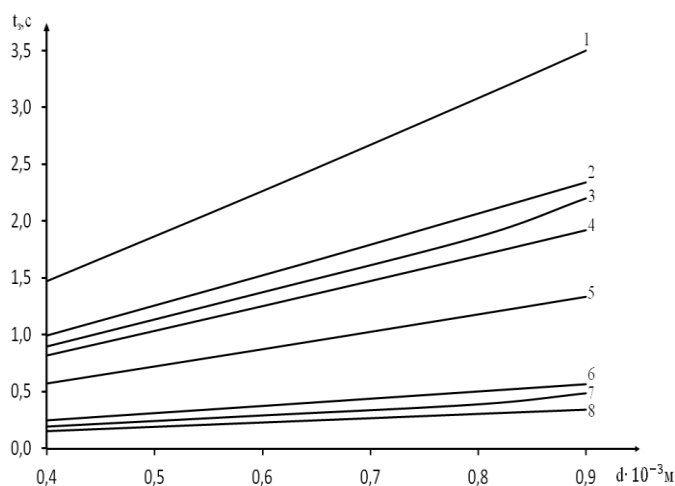


Рисунок 7. Зависимость времени задержки зажигания от диаметра частицы при различных условиях теплообмена: 1,5- $T_c=1000$ К; 2,6- $T_c=1300$ К; 3,7- $T_c=1400$ К; 4,8- $T_c=1500$ К; 1÷4—конвективный теплообмен. 5÷8—радиационно-конвективный подвод тепла.

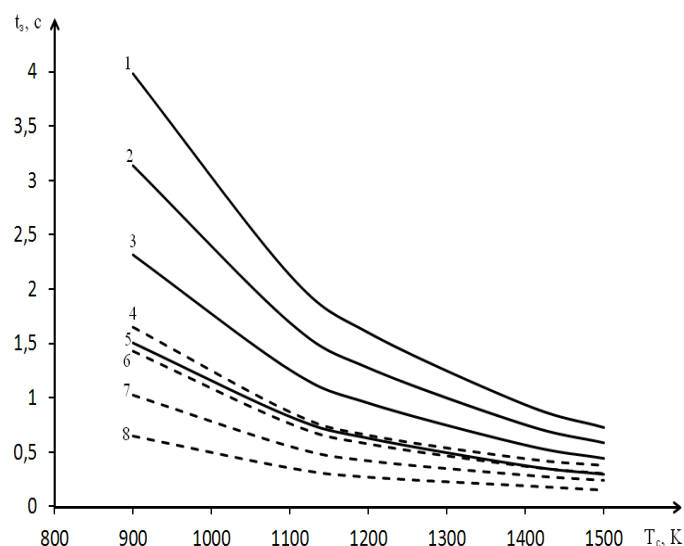


Рисунок 8. Зависимость времени задержки зажигания от температуры окружающей среды для частиц размером: 1- $\delta=1 \cdot 10^{-3}$ м; 2- $\delta=0,8 \cdot 10^{-3}$ м; 3- $\delta=0,6 \cdot 10^{-3}$ м; 5- $\delta=0,4 \cdot 10^{-3}$ м—частица в форме куба. 4- $\delta=1 \cdot 10^{-3}$ м; 6- $\delta=0,8 \cdot 10^{-3}$ м; 7- $\delta=0,6 \cdot 10^{-3}$ м; 8- $\delta=0,4 \cdot 10^{-3}$ м—частица в форме сферы.

геометрическая конфигурация частиц. Так частица в форме куба в среде с температурой $T_c=900$ К, воспламеняется почти в 2,5 раза медленнее, чем сопоставимая по размерам сферическая частица. Полученные зависимости можно объяснить более высокой способностью сферы аккумулировать тепловую энергию. Соответственно рост температуры поверхности сферической частицы происходит существенно быстрее, по сравнению с кубической (рисунок 8).

При рассмотрении сложных топливных композиций, к которым относится ВУТ, возникают проблемы, связанные с определением эффективных теплофизических характеристик. В общем случае частица ВУТ представляет собой многокомпонентную топливную композицию, состоящую из частиц угля и пор, заполненных водой. Теплофизические характеристики пористой структуры являются важным фактором при определении условий зажигания частиц ВУТ. При решении задачи зажигания принимались три различные модели теплофизических характеристик топлива. Первый подход основывался на модели долевого соотношения основных компонентов топлива. Вторая модель базировалась на результатах исследования Оделевского (теплофизические характеристики находились по схеме водоугольной композиции). Третий вариант—гипотеза об адекватности теплофизических свойств ВУТ и угольного топлива.

В результате численных исследований установлено (рисунок.9.), что времена задержки зажигания существенно отличаются при различных моделях теплофизических свойств водоугольных топлив. Так частицы ВУТ, теплофизические свойства которых рассчитывались по схеме Оделевского, воспламеняются почти в 2 раза быстрее, чем частицы, теплофизические характеристики которых принимались равными характеристикам угольного топлива.

Известно что, транспорт угольного топлива в настоящее время является весьма дорогостоящей. По этой причине большинство тепловых электростанций строится вблизи разведанных месторождений. Однако теплофизические и термохимические характеристики различных углей часто могут существенно отличаться. В результате при проектировании топочных устройств котельных агрегатов целесообразно учитывать специфику углей. Соответственно такая же проблема возникает и при обосновании конструктивных характеристик топочных устройств водоугольных котельных агрегатов ТЭС. Задачи численного анализа исследуемого процесса в рамках разработанной модели воспламенения состояли в определении влияния характеристик базового материала (марка и место добычи) на условия зажигания частиц водоугольного топлива.

В качестве основной составляющей для водоугольного топлива были выбраны угли различных марок и месторождений: АШ Донецкого угольного бассейна, марки «Д» Кузнецкого угольного бассейна (шахта «Инская»), бурый уголь марки Б-2 Березовского месторождения.

В результате численного моделирования установлены времена задержки зажигания (рисунок.10) частиц различных диаметров, выполненных из углей трех марок. Можно отметить, что быстрее всего воспламеняются частицы ВУТ

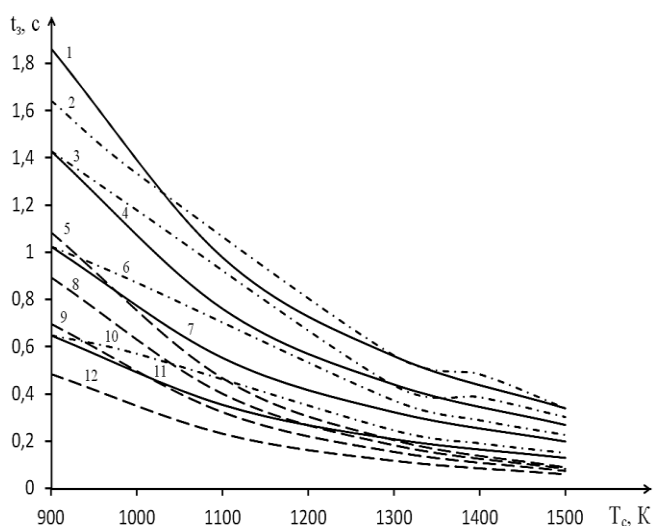


Рисунок 9. Зависимость времени задержки зажигания от температуры внешне среды при различных представлениях о теплофизических свойствах частиц диаметром: 1;2;5- $d=1 \cdot 10^{-3}$ м; 3;4;8- $d=0,8 \cdot 10^{-3}$ м; 6;7;9- $d=0,6 \cdot 10^{-3}$ м; 10;11;12- $d=0,4 \cdot 10^{-3}$ м; 1;4;7;11-теплофизические свойства соответствуют чистому углю; 2;3;6;10-теплофизические свойства определялись по модели (1-15); 5;8;9;12-теплофизические свойства рассчитывались по модели Оделева;

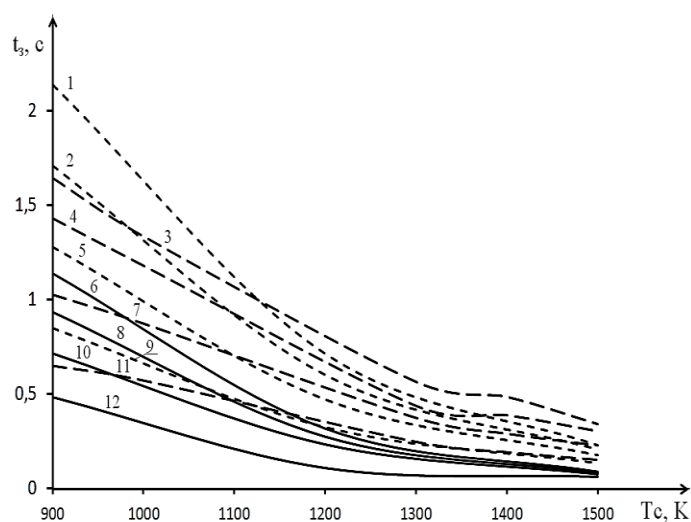


Рисунок 10. Зависимость времени задержки зажигания от температуры внешней среды водоугольных частиц из углей различных марок диаметром: 1;3;6- $1 \cdot 10^{-3}$ м; 2;4;8- $0,8 \cdot 10^{-3}$ м; 5;7;10- $0,6 \cdot 10^{-3}$ м; 9;11;12- $0,4 \cdot 10^{-3}$ м; 1;2;5;9 – АШ Донецкого угольного бассейна; 3;4;7;11 – уголь марки «Д» Кузнецкого бассейна (шахта «Инская»); 6;8;10;12 – бурый уголь Березовского месторождения, марки Б-2.

приготовленные из бурого угля. Медленнее всего зажигаются водоантрацитовые частицы. Это можно объяснить повышенной реакционной способностью углей марки Б (высокое содержание летучих) и низкой теплопроводностью.

Полученные по результатам проведенных теоретических исследований условия и характеристик зажигания частиц водоугольных топлив являются основанием для выработки ряда рекомендаций по практическому применению полученных теоретических следствий при разработке технологий сжигания ВУТ в топочных устройствах котельных агрегатов.

1) Одним из основных результатов является вывод о том, что с ростом температуры среды, уменьшается влияние размеров частиц, характеристик топлив в целом и его отдельных компонент на время задержки зажигания. Поэтому при высоких значениях температур (более 1000K) внешней среды при анализе характеристик зажигания частиц ВУТ могут использоваться упрощенные подходы и модели, не учитывающие, например, переход на другой вид топлива, изменение размеров или формы частиц. В условиях же низких температур (менее 1000K) упрощения физических и соответственно математических моделей могут привести к большим (до 200% и более) отклонениям по условиям и характеристикам зажигания.

Другими словами при разработке технологий сжигания водоугольных топлив например в топках водогрейных котлов уровень математического моделирования должен быть более высоким (в частности детализация физических процессов и свойств топлив), чем при конструкторской проработке паровых котлов. В последнем случае, как это ни парадоксально, в условиях высоких температур топочной среды возможны упрощенные подходы к оценки времен задержки зажигания ВУТ.

В тоже время необходимо отметить, что водоугольные топлива перспективны не только в «большой», но и в «малой» энергетике. В последнем случае их использование является даже более простым и технологичным.

2) На основании результатов, полученных при выполнении настоящего диссертационного исследования, можно рекомендовать следующий алгоритм анализа влияния формы частицы ВУТ на характеристики зажигания этого топлива. Анализ условий и расчет характеристик этого процесса целесообразно проводить в два этапа. На первом этапе при моделировании процесса зажигания частицы в форме сферы рассматриваются времена задержки и определяются предельные температуры, которые являются нижними оценками t_z . На втором этапе после решения задачи для частицы в форме куба определяются значения времен задержки, которые являются верхними оценками. На основании полученных при таком поэтапном анализе результатов выделяется диапазон значений t_z , который в дальнейшем целесообразно дополнительно исследовать. Поэтому средние по установленному диапазону значения t_z будут в большей степени приближены к реальным.

3) Одним из важных выводов, сформулированных по итогам выполненных исследований, является вывод о необходимости учета лучистого нагрева частиц ВУТ в период индукции. Поэтому при оценке времен задержки

зажигания этой компоненты теплового потока пренебрегать нельзя. Особо значим вклад радиационного нагрева в топочных устройствах энергетических котлов.

4) На основании обобщения полученных при работе над диссертацией результатов можно рекомендовать при выборе предпочтительных характерных размеров частиц ВУТ следующие мероприятия.

При расчете t_3 «крупных» ($d > 0,5 \cdot 10^{-3}$ м) частиц целесообразно учитывать влияние всех основных последовательных значимых факторов (зависимость теплофизических свойств характеристик от температуры, индивидуальные свойства угля, доля влаги, форма частицы). При моделировании процессов зажигания «мелких» частиц могут быть использованы существенно упрощенные модели, не учитывающие большую группу вышеуказанных факторов.

При использовании в топках водоугольных котлов бурых углей необходимо учитывать в полной мере их индивидуальные свойства, которые при относительно низких температурах проявляются отчетливо. В условиях высоких топочных температур все эти различия сглаживаются и возможно использование упрощенных моделей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые постановлена и решена нелинейная нестационарная задача зажигания частицы водоугольного топлива в условиях, соответствующих топочным условиям котельных агрегатов тепловых электрических станций, в рамках модели воспламенения, учитывающей совместное протекание основных процессов термической подготовки: теплопроводность, влагоудаление, фильтрационный тепло-массоперенос, термическая деструкция органической части топлива с выходом летучих, термохимическое взаимодействие водяных паров и углерода кокса, экзотермическое взаимодействие продуктов термического разложения и термохимического взаимодействия водяных паров и кокса с окислителем на поверхности частицы.

2. Показано, что размеры частиц ВУТ и температура внешней среды играют определяющую роль в процессе зажигания топлива. Так можно отметить, что увеличение диаметра приводит к замедлению процесса воспламенения. Такая же ситуация наблюдается и при уменьшении температуры внешней среды. Отдельно стоит сказать, что для каждой частицы существует свой предельный по температуре случай воспламенения. Установлено что при температуре внешней среды ниже $T=800\text{K}$ необходимые условия воспламенения не выполняются.

3. Установлено, что тепловые эффекты испарения влаги, термического разложения и фильтрации существенно замедляют процесс воспламенения частицы ВУТ.

4. Полученные времена задержек зажигания частиц водоугольных топлив (с учетом зависимости теплофизических характеристик от температуры) позволяют сделать вывод о двух возможных режимах воспламенения: низкотемпературный, при котором зависимость теплофизических свойств угля от температуры оказывает существенное влияние на время задержки зажигания, и высокотемпературный, при котором такое влияние несущественно.

5. Исследовано влияние теплоизлучения внешней среды на характеристики и условия зажигания. Установлено, что лучистая составляющая теплообмена оказывает существенное влияние на характеристики воспламенения. Так частица водоугольного топлива, в условиях конвективно-лучистого теплообмена, воспламеняется почти в 2 раза быстрее, чем такая же частица, но в условиях только конвективного нагрева.

6. Выполнено численное исследование процесса зажигания частиц ВУТ различных геометрических конфигураций (на примере куба и сферы). Показано, что формы частицы оказывает существенное влияние на время задержки зажигания. Так сферическая частица зажигается почти в 2,5 раза быстрее, чем сопоставимая по размерам кубическая частица. При анализе условий и характеристик зажигания водоугольных топлив с учетом всего многообразия возможных конфигураций можно выполнять предельные оценки времен задержки зажигания. В этом случае одна оценка будет верхней, другая нижней.

7. Установлено существенное влияние гетерогенности структуры водоугольного топлива на условия и характеристики воспламенения. Проведенный численный анализ показал, что при различных формах представления теплофизических характеристик топлива времена задержек зажигания значительно отличаются. Частицы, теплофизические характеристики которых вычисляются по схеме Оделевского воспламеняются в 2,5 раза быстрее чем, такие же частицы, теплофизические характеристики которых приняты равными характеристикам угля.

8. Численный анализ влияния теплофизических и термохимических характеристик углей различных марок и месторождений показал, что марка угля, из которого приготовлено ВУТ, играет существенную роль в процессах воспламенения. Так частицы ВУТ, выполненные из Березовских углей (Б-2), загораются в 2 раза быстрее, чем такие же водоантрацитовые частицы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Сыродой, С. В.** Математическое моделирование сжигание водоугольного топлива в вихревом топочном устройстве / А. В Савченко, В. В. Саломатов, А. В. Гиль, Л. И. Мальцев, С. В. Сыродой // Горение и плазмохимия. – 2012, – Т. 10, – № 2. – С. 95–105.
2. **Сыродой, С. В.** Зажигание водоугольной частицы лучисто-конвективным теплом / С. В. Сыродой, В. В. Саломатов // Горение и плазмохимия. – 2011. – Т 9, – № 1. – С. 29–34.
3. **Syrodoy, S. V.** Concentration organic components in the hydrocarbon fuel particles conditions and characteristic of ignition / V. V. Salomatov, S. V. Syrodoy, N. Y. Gutareva // EPJ Web of Conferences, 2014, V. 76, P. 01018.
4. **Syrodoy S. V.** Modelling of heat and mass transfer to solve the problem of particle ignition water-coal fuel / V. V. Salomatov, S. V. Syrodoy and N. Y. Gutareva // 2014 IOP Conference Series.: Materials Science Engineering 66 012040.
5. **Сыродой, С. В.** Численное моделирование зажигания водоугольной частицы с учетом испарения влаги и эндотермического разложения твердой горючей

- компоненты / С. В. Сыродой, В. В. Саломатов, Г. В. Кузнецов // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4-3. – С. 28–32.
6. **Сыродой, С. В.** Перевод котлов малой мощности на водоугольную технологию / В. В. Саломатов, У. В. Дорохова, С. В. Сыродой // Ползуновский вестник. – 2013 – №. 4-3. – С. 38-46
 7. **Сыродой, С. В.** Реконструкция котлов малой теплоэнергетики на сжигание водоугольного топлива / В. В. Саломатов, У. В. Дорохова, С. В. Сыродой // "Энергетика и теплотехника".- Сб. науч. Трудов под ред. акад. РАН Накорякова В. Е. – 2014. – № 18. – С. 18-33.
 8. **Сыродой, С. В.** Математическое моделирование комплекса процессов теплопереноса сопутствующих сушке угольной частицы / С. В. Сыродой // Горение твердого топлива: сборник тезисов и статей всероссийской молодежной конференции.– Томск: Изд-во Томского политехнического университета 03.10.2012–05.10.2012.– С.114–117.
 9. **Сыродой, С. В.** Математическое моделирование сушки и термического разложения частицы водоугольного топлива / С. В. Сыродой, В. В. Саломатов, Г. В. Кузнецов // Горение твердого топлива: Тезисы докладов VIII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 13– 16 ноября 2012 г. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2012.– С. 88.1–88.7.
 10. **Сыродой, С. В.** Математическое моделирование воспламенения частицы водоугольного топлива / С. В. Сыродой, Г. В. Кузнецов // Перспективы развития фундаментальных наук [Электронный ресурс]: труды XI Международной конференции студентов и молодых учёных. Россия, Томск, 22–25 апреля 2014 г.– Режим доступа: http://science-persp.tpu.ru/Previous%20Materials/Konf_2014. Свободный.– С.206–209.
 11. **Сыродой, С. В.** Математическое моделирование зажигания водоугольной частицы с учетом пиролиза угольной компоненты топлива / С. В. Сыродой, Г. В. Кузнецов // материалы трудов XIX Всероссийской научно-технической конференции / Томский политехнический университет, 4-6 декабря 2013 – Томск: Изд-во ООО «Скан», 2013. Т. I. – С. 319–322.
 12. **Сыродой, С.В.** Зажигание водоугольной частицы лучисто-конвективным теплом/ С.В. Сыродой // Тинчуринские чтения: материалы докл. VI междунар. молодеж. науч. конф. В 4 т. Т.2. - Казань: КГЭУ, 2011. - С.220-221.