

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Научно-образовательный центр И. Н. Бутакова

Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль Технологии промышленной теплотехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы

**«Зажигание частицы водоугольного топлива при высоких давлениях
окислительной среды»**

УДК 536.468:662.758.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ83	ВАЛИЕВА Лилия Евгеньевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ И. Н. Бутакова ИШЭ	Б. В. Борисов	д.ф.-м.н., профессор		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник НОЦ И. Н. Бутакова ИШЭ	С. В. Сыродой	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	В. А. Маланина	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преп. ООД ШБИП	С. В. Романова			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель Отделения/НОЦ/ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И. Н. Бутакова ИШЭ	В. И. Максимов	к.т.н., доцент		

Томск – 2020 г

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы магистратуры по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код	Результат обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Профессиональные компетенции		
P1	Применять глубокие естественно-научные, математические и инженерные знания для формулирования заданий на разработку проектных решений, проектировать инновационные теплоэнергетические и теплотехнические системы и оборудование, разрабатывать проектные решения, связанные с модернизацией технологического оборудования	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-1, 2, ПК-1, 3,), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Применять глубокие знания в области современных технологий промышленной теплотехники для решения междисциплинарных инженерных задач разработки и проведения мероприятий по совершенствованию технологии производства, обеспечению экономичности, надежности и безопасности эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-1, 2, ПК-1, 3, 8), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа, в области технологий промышленной теплотехники, с использованием современных методов и средств математического моделирования и практической инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-2, ПК-1, 2, 3), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Разрабатывать инновационные технологические процессы, проектировать и использовать новое оборудование выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки, применять инновационные методы исследования, проводить исследования, критически интерпретировать, публично представлять и обсуждать результаты научных исследований	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-1, 2, ПК-1, 3, 7), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области современных технологий промышленной теплотехники в сложных, неопределенных условиях и представлять полученные результаты	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-1, 2, ПК-1, 2, 3, 7), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P6	Применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности при внедрении, эксплуатации и обслуживании современных высокотехнологичных аппаратов и систем, обеспечивая их высокую эффективность, соблюдение правил охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды	Требования ФГОС ОК-1, 2, ОПК-1, ПК-3, 4, 5, 6, 9, 10), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС ОК-1, ПК-11), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Универсальные компетенции		
P8	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной профессиональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной научно-исследовательской и инженерной деятельности	Требования ФГОС ОПК-2, 3, ПК-7), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Р9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, действовать в нестандартных ситуациях, принимать организационно-управленческие решения и нести за них ответственность при организации работ, разрабатывать мероприятия по предотвращению экологических нарушений	Требования ФГОС ОК-1, 2, ОПК-1, ПК-3, 4, 5, 7, 8, 9, 10), Критерий 5 АИОР (пп. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р10	Демонстрировать глубокие знания философских аспектов инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах устойчивого развития, мыслить абстрактно, обобщать, анализировать, систематизировать и прогнозировать, принимать решения в сложных инженерных задачах с технической неопределенностью и недостатком информации	Требования ФГОС ОК-1, 2, ОПК-1, ПК-3, 4, 5, 7, 8, 9, 10), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р11	Самостоятельно учиться и, используя творческий потенциал, саморазвиваться, самореализовываться непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС ОК-1, 3, ОПК-1, ПК-4, 8), Критерий 5 АИОР (1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Научно-образовательный центр И. Н. Бутакова

Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль Технологии промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

В. И. Максимов

(Подпись)

(Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

(бакалаврской работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ83	Валиевой Лилии Евгеньевне

Тема работы:

**«Зажигание частицы водоугольного топлива при высоких давлениях
окислительной среды»**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

от 12.02.20 №43-61/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

1 июня 2020 года

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Объект исследования – капля водоугольного топлива.

Предмет исследования – характеристики процесса зажигания частиц ВУТ.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Аналитический обзор источников литературы; 2. Проведение экспериментального исследования; 3. Формулирование физической модели; 4. Формулирование математической постановки задачи; 5. Верификация математической модели; 6. Численное и экспериментальное исследование влияния различных факторов на условия зажигания капель ВУТ; 7. Формулирование предложений для практического применения результатов исследования; 8. Заключение.
--	--

<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация (25 слайдов).</p>
--	----------------------------------

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Маланина Вероника Анатольевна, к.э.н., доцент ОСГН ШБИП
Социальная ответственность	Романова Светлана Владимировна, старший преподаватель ООД ШБИП

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:
Аналитический обзор источников литературы

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	1 декабря 2019 года
---	----------------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ И. Н. Бутакова ИШЭ	Б. В. Борисов	д.ф.-м.н., профессор		1.12.19

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ83	Валиева Лилия Евгеньевна		1.12.19

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 119 с., 21 рис., 8 табл., 55 ист., 1 прил.

Ключевые слова: математическое моделирование, водоугольное топливо, двигатель внутреннего сгорания, время задержки зажигания, электроискровой нагрев, микроволновый нагрев, адиабатное сжатие.

Объектом исследования является процесс тепломассопереноса в частице водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания двигателей внутреннего сгорания.

Цель работы – численное и экспериментальное исследование процессов теплопереноса в частице водоугольного топлива в условиях, соответствующих поршневым камерам внутреннего сгорания ДВС.

В процессе исследования проводилась оценка влияния основных параметров (сила тока на электроде, давление и температура окислителя, мощность внутреннего источника тепловыделений, температуры частицы) на характеристики процесса тепломассопереноса капель водоугольного топлива в камерах сгорания ДВС.

В результате исследований получены зависимости времени задержки зажигания от мощности нагревательного элемента, температуры и давления окислителя, мощности внутреннего источника тепловыделений, температуры частицы. Также представлены поля температур при различных режимах зажигания капель водоугольного топлива.

Рассматриваемая математическая постановка задачи разрешалась методом конечных разностей в среде программирования Matlab.

Область применения – результаты теоретического и экспериментального исследования могут стать теоретической базой при проектировании новых двигателей внутреннего сгорания, работающих на водоугольном топливе.

Сокращения и обозначения

Принятые сокращения:

- ДВС – двигатель внутреннего сгорания;
КПД – коэффициент полезного действия;
ВУС – водоугольная суспензия;
ВУТ – водоугольное топливо;
КС – камера сгорания;
ПК – персональный компьютер.

Принятые обозначения:

- c – массовая изобарная теплоемкость, кДж/(кг·К);
 ρ – плотность, кг/м³;
 T – температура, К;
 τ – время, с;
 u, v – скорость водяных паров и парогазовой смеси по радиусу и углу, м/с;
 r – радиус частицы, м;
 d – диаметр частицы, м;
 φ – азимутальный угол, рад;
 $\vartheta(r, \varphi)$ – функция Хевисайда;
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 $Q_{\text{исп/тр}}$ – тепловой эффект химической реакции (испарение, термическое разложение), кДж/кг;
 $W_{\text{исп}}$ – массовая удельная скорость испарения, кг/(м²·с);
 h_d – параметр размазывания, м;
 $\delta(r, \varphi)$ – функция Дирака;
 $W_{\text{тр}}$ – скорость термического разложения топлива, кг/(м³·с);
 σ – проводимость, 1/(Ом·м);
 E^2 – квадрат напряженности электрического поля, В²/м²;

T_3 - температура тройной точки, К ($T_3 = 273,16$ К);
 W_0 – скорость испарения при температуре T_3 ;
 μ – молярная масса водяного пара, кг/моль;
 R – газовая постоянная, Дж/(моль·К).
 T – температура на границе испарения, К.
 η – параметр выгорания;
 k - предэкспонента химической реакции, 1/с;
 E – энергия активации, Дж/моль.
 V_0 – содержание летучих;
 $Q_{\text{хим}}$ – тепловой эффект химической реакции, Дж/(кг);
 $W_{\text{хим}}$ – скорость химической реакции, кг/(м³·с);
 U – потенциал электрического поля, В;
 c_i – концентрация компонента, кг/кг;
 E_i – энергия активации химической реакции, Дж/моль;
 g_i – массовая доля, кг/кг;
 D_i – коэффициент диффузии, м²/с;
 Π – пористость топлива;
 k_p – коэффициент проницаемости, м²;
 μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с;
 β – коэффициент сжимаемости газообразных продуктов пиролиза, 1/Па;
 s – размер пор, м;
 χ -коэффициент пьезопроводности, м²/с;
 $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ – плотность водяных паров, кг/м³;
 W_i – скорость выхода летучих компонентов, кг/(м²·с);
 $W_{\text{C}+\text{O}_2}$ – скорость реакции $\text{C}+\text{O}_2=\text{CO}_2+18,67$, кг/(м²·с);
 ε_1 - приведённая степень черноты;
 $\sigma_{\text{сб}}$ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴)
 τ_1 – время тепловой релаксации, с;
 Q_T – тепловой поток, Вт;

W_T^2 – волновая скорость распространения тепла, м/с;

qv_0 – текущая плотность внутреннего источника тепла, Вт/м³;

$k_{эм}$ – коэффициент поглощения углем электромагнитного излучения, 1/м.

T_0 – начальная температура, К;

T_K – температура в конце процесса сжатия, К;

$k_{ад}$ – показатель адиабаты;

P_0 – начальное давление, Па;

P_K – давление в конце процесса сжатия, Па;

φ – объемная доля соответствующего компонента топлива;

τ_3 – время задержки зажигания, с;

Q – мощность нагревательного элемента, Вт;

I – сила тока, А;

τ_1 – время хода поршня ДВС, с.

Безразмерные комплексы:

$t = \frac{\tau}{\tau_0}$ – безразмерное время;

$R = \frac{r}{r_0}$ – безразмерный радиус;

$\theta = \frac{T}{T_e}$ – безразмерная температура;

$C = \frac{c}{c_0}$ – безразмерная теплоемкость;

$\Lambda = \frac{\lambda}{\lambda_0}$ – безразмерная теплопроводность;

$P = \frac{\rho}{\rho_0}$ – безразмерная плотность;

$W = \frac{u}{u_0}$ – безразмерная скорость;

$V = \frac{v}{v_0}$ – безразмерная скорость;

$Fo = \frac{a_0 \cdot \tau_0}{r_0^2}$ – критерий Фурье;

$Re = \frac{u_0 \cdot r_0}{a_0}$ – критерий Пекле;

$\Lambda_{\text{тепло}} = \frac{l^2}{W_T^2 \cdot \tau^2}$ – тепловой импульс;

$\text{Rom}_{\text{исп}} = \frac{Q_{\text{исп}} W_{\text{исп}} r_0^2}{h_0 T_e \lambda}$ – критерий Померанцева, учитывающий испарение;

$\text{Rom}_{\text{т.р.}} = \frac{Q_{\text{т.р.}} W_{\text{т.р.}} r_0^2}{T_e \lambda_0}$ – критерий Померанцева, учитывающий термическое разложение;

$\text{Rom}_{\text{эм}} = \frac{\sigma_{\text{эм}} \cdot E^2 \cdot r_0^2}{T_e \lambda_0}$ – критерий Померанцева, учитывающий электроискровой нагрев;

$\text{Rom}_{\text{свч}} = \frac{q_{\text{v0}} \cdot \exp(-k_{\text{эм}} R) \cdot r_0^2}{T_e \lambda_0}$ – критерий Померанцева, учитывающий микроволновый нагрев;

$\Sigma \text{Rom}_{\text{хим}} = \frac{Q_{\text{хим}} W_{\text{хим}} r_0^2}{T_e \lambda_0}$ – критерий Померанцева, учитывающий теплоту, выделившуюся в результате химической реакции;

$U' = \frac{U}{U_0}$ – безразмерный потенциал;

$D' = \frac{D}{D_0}$ – безразмерный коэффициент диффузии;

$\text{Fo}^d = \frac{D \cdot \tau}{r^2}$ – диффузионный критерий Фурье;

$\text{Pe}_{\text{дифф}} = \frac{u_0 \cdot r_0}{D_0}$ – критерий Пекле диффузионный;

$\Sigma \text{Rom}_{\text{дифф}} = \frac{\Sigma W_i r_0^2}{\rho_g \cdot D}$ – критерий Померанцева, учитывающий теплоту химического взаимодействия;

$P' = \frac{P}{P_{\text{атм}}}$ – безразмерное давление;

$X = \frac{\chi}{\chi_0}$ – безразмерный коэффициент пьезопроводности;

$\text{Fo}^H = \frac{m \cdot r^2}{\tau \cdot \chi}$ – критерий Фурье для уравнения пьезопроводности;

$\text{Rom}_{\text{исп}}^{P'} = \frac{W_{\text{исп}}}{s \cdot \beta \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \frac{r_0^2}{\chi_0 \cdot P_{\text{атм}}} \cdot \delta(r, \varphi)$ – критерий Померанцева, учитывающий испарения для уравнения пьезопроводности;

$\text{Pom}_{\text{тр}}^{P'} = \frac{W_{\text{тр}}}{\beta \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \frac{r_0^2}{\chi_0 \cdot p_{\text{atm}}} \cdot \vartheta(r, \varphi)$ – критерий Померанцева, учитывающий

термическое разложение для уравнения пьезопроводности;

$\text{Ki} = \frac{Q_{\text{C}+\text{O}_2} \cdot W_{\text{C}+\text{O}_2} \cdot r_0^2}{T_e \lambda_0}$ – критерий Кирпичева;

$\text{Sk} = \frac{\sigma_{\text{сб}} \cdot \varepsilon_1 \cdot T_e^3 \cdot r_0}{\lambda_0}$ – критерий Старка;

$\text{Ki}^{\text{d}} = \frac{W_{\text{C}+\text{O}_2} \cdot r_0}{\rho_{\text{g}} \cdot D_0}$ – критерий Кирпичева диффузионный;

Подстрочные индексы:

0 – начальное состояние топлива (масштабы обезразмеривания);

1 – частица ВУТ;

2 – газ;

3 – электрод;

4 – вода;

5 – уголь;

6 – водяные пары;

i, j – компонент среды;

дифф – диффузионный;

исп – испарение;

тр – термическое разложение;

хим – химическая реакция;

эм – электромагнитный нагрев;

свч – микроволновый нагрев;

out – внешний;

g – газовая область;

atm – атмосфера;

e – окружающая среда (окислитель);

s – состояние насыщения;

C+O₂ – химическая реакция C+O₂=CO₂+18,67;

k – конечное.

Содержание

Введение	15
1.Современные исследования в области водоугольного топлива	18
1.1 Применение ВУТ в качестве основного топлива в ГТУ и ДВС	18
1.2 Теоретические исследования процессов воспламенения капель водоугольного топлива	26
2. Экспериментальное исследование	36
3. Модель зажигания капли водоугольного топлива.....	38
3.1 Физическая модель горения капли водоугольного топлива в условиях электроискрового нагрева.....	38
3.2 Математическая модель горения капли водоугольного топлива в условиях электроискрового нагрева	39
3.3 Физическая модель горения водоугольного топлива в условиях микроволнового нагрева и адиабатного сжатия.....	45
3.4 Математическая модель горения водоугольного топлива в условиях микроволнового нагрева и адиабатного сжатия.....	47
3.5 Тестовые задачи процесса тепломассопереноса	57
3.5.1 Теплопередача в сплошном цилиндре.....	57
3.5.2 Нестационарная задача теплопроводности в однородном сечении цилиндрической формы	58
4 Результаты экспериментального и теоретического исследования характеристик процесса тепломассопереноса при зажигании капли водоугольного топлива.....	60
4.1 Влияние мощности нагревательного элемента и давления окислителя на характеристики и условия зажигания водоугольной частицы	61
4.2 Влияние температуры внешней среды на характеристики и условия зажигания водоугольной частицы при радиационно-кондуктивно-конвективном и электроискровом нагреве	62

4.3 Влияние конечного давления окислителя в условиях адиабатного сжатия на характеристики зажигания водоугольной частицы	66
4.4 Влияние мощности внутреннего источника тепловыделения на условия и характеристики зажигания водоугольной частицы в условиях адиабатного сжатия	69
4.5 Влияние температуры частицы на условия и характеристики зажигания капель ВУТ в метастабильном состоянии	71
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	74
5.1 Перечень работ и оценка времени их выполнения	74
5.2 Смета затрат	75
5.2.1 Материальные затраты	75
5.2.2 Амортизация компьютерной техники и экспериментального оборудования	76
5.2.3 Затраты на заработную плату	77
5.2.4 Затраты на социальные отчисления	78
5.2.5 Прочие затраты	78
5.2.6 Накладные расходы	79
6 Социальная ответственность	87
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	88
6.2 Производственная безопасность	89
6.3 Анализ опасных и вредных факторов	90
6.3.1 Отклонение показателей микроклимата	90
6.3.2 Превышение уровня шума	91
6.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны	92
6.3.4 Воздействие электромагнитного поля	92
6.3.5 Воздействие электростатического потенциала	93
6.3.6 Повышенная температура поверхности оборудования	94
6.4 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов	94
6.5 Экологическая безопасность	95
6.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	96

6.6.1 Поражение человека электрическим током и электрической дугой	96
6.6.2 Пожарная безопасность	97
Заключение	100
Список использованных источников	103
Приложение А	109

Введение

По прогнозам специалистов [1], работающих в области мирового энергетического хозяйства, к середине XXI-го столетия около 10% всей энергии будет вырабатываться на тепловых электростанциях, сжигающих уголь. Это обусловлено существенными преимуществами угля по сравнению с другими теплоносителями, такими как нефть и природный газ. Стоит отметить, что по оценкам специалистов, работающих в области топливной геологии нефтяных ресурсов на планете (при условии сохранения существенного уровня потребления) хватит на ближайшие 150 лет, природного газа – на 50 лет [2]; угольного топлива – на 270 лет [1]. При этом угольное топливо более равномерно распределено на всех 6-ти континентах [1]. Соответственно, можно сказать, что широкомасштабное внедрение угольного топлива в общий баланс тепло - и электрогенерации приводит к существенной стабилизации турбулентной динамики ценообразования на основные энергоносители (нефть, природный газ). Уголь существенно дешевле продуктов нефтепереработки. Соответственно, в условиях масштабного внедрения угольного топлива в энергетику приведет к снижению цены за единицу электроэнергии для конечного потребителя (промышленность, городская агломерация и др.) [3].

Но при сжигании угля образуется большое количество антропогенных выбросов (например, оксиды азота – NO_x или серы -). Также стоит сказать, что при сжигании угольного топлива образуется достаточно много золовых отложений на поверхностях теплообмена. Также уголь обладает низкой теплотворной способностью. Самая главная проблема заключается в том, что при сжигании угля происходит коррозионный износ аппаратов.

Одним из наиболее перспективных технологических решений вышеупомянутых проблем угольной энергетики является технология сжигания угля в составе композиционного водоугольного топлива (ВУТ).

Последнее представляет собой смесь мелкодиспергированного угля, воды и присадок пластификаторов (предотвращающих выпад угля в осадок). Известно [3], что при сжигании ВУТ образуется значительно меньше оксидов азота и серы, чем при горении угля. Проведенные исследования сжигания водоугольного топлива показали, что уровень выбросов существенно снижается [4].

Также стоит отметить, что водоугольное топливо может передаваться на большие расстояния трубопроводным транспортом. Как показали теоретические исследования транспортировка водоугольной суспензии по трубопроводам существенно выгоднее, чем железнодорожным транспортом. При этом с увеличением расстояния транспортировки экономическая выгода возрастает экспоненциально. Существенным преимуществом ВУТ перед традиционным угольным топливом является то, что ВУТ можно хранить в резервуарах бакового типа большого объема. Последнее существенно сокращает площади ТЭС значительными топливными складами [1].

Немаловажным фактом является и то, что ВУТ может выступать в качестве топлива для газотурбинных (ГТУ) и парогазовых энергетических установках (ПГУ). Уже давно известно [4], что энергетическая эффективность ГТУ намного выше, чем у паросиловых установок работающих по циклу Ренкина (порядка 65% у ГТУ и 40-45 % у ПГУ). На настоящее время в газотурбинных установках сжигается природный газ (реже мазут). Стоит отметить, что сжигание природного газа в ГТУ нецелесообразно, т.к. он является ценным ресурсом для нефтехимической промышленности.

Также стоит отметить, что в западных странах соответствующими специалистами водоугольное топливо рассматривается как альтернативный источник энергии для тихоходных двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Применение ВУТ в качестве основного топлива для ДВС и ГТУ имеет ряд существенных преимуществ. Во-первых, значительно сокращаются выбросы оксида азота и серы, во-вторых, существенно расширяется сырьевая

база для ДВС. Это будет способствовать значительному снижению цен на нефтепродукты. Но стоит также отметить, что несмотря на все преимущества водоугольное топливо не рассматривается как основное топливо для тепло- и электрогенерации. Это обусловлено слабой изученностью теплофизических процессов, протекающих при горении водоугольного топлива, соответствующих камерам сгорания газовых турбин или ДВС.

1 Современные исследования в области водоугольного топлива

Ниже представлен аналитический обзор экспериментальных и теоретических исследований [5-39] по возможности применения водоугольного топлива в газотурбинных установках и двигателях внутреннего сгорания.

1.1 Применение ВУТ в качестве основного топлива в ГТУ и ДВС

Первые попытки создания поршневого двигателя внутреннего сгорания, работающего на твёрдом топливе приходится на период с 1839-1939 гг. Активным исследованием занимался немецкий инженер Рудольф Дизель. С каждым годом исследования ДВС, работающего на твердом топливе становилось актуальней. Так компания Napomag создала ДВС на твердом топливе. Точных данных не сохранилось, известно только, что двигатель проработал около 700 часов. На этом исследования поршневых ДВС не заканчивались. Активные исследования проводились в Германии в институте Карнеги (США). Здесь были получены более высокие показатели эффективности. Но исследования довоенного времени ограничивалось следующими факторами [5]:

- 1.отсутствие специальной системы продувки;
- 2.усовершенствование системы смазки;
3. модернизация системы топливоподачи;
4. уменьшение износа аппаратов.

В послевоенное время исследования твердотопливных ДВС проводились в Северной Каролине. Экспериментальные исследования проводились на четырехтактном двигателе внутреннего сгорания [5]. Авторами установлено, что для полноценного сжигания топлива необходимо

доработать систему топливоподачи, регулировать начало впрыска топлива, оптимизировать фазы газораспределения и объем камеры.

Актуальными исследованиями в период с 1957 гг. является применение угольного топлива в тепловозном двигателе [5]. Активные экспериментальные работы проводились в Юго-Западном исследовательском институте (США). Эксперимент проводился из смеси, содержащей 30% угольной пыли (размер частиц около 20 мкм). По проведенному эксперименту установлено, что при высокой частоте вращения угольные частицы не успевают полностью выгорать. В выпускных клапанах обнаружены золотые отложения. Также установлено, что сжигание твердого топлива возможно только в тихоходных двигателях внутреннего сгорания. Несмотря на предыдущий неудачный опыт в 1959 г. в Вирджинии проводят экспериментальное исследование тепловозного двигателя [5]. Авторы заключили, что для полноценной работы тепловозного двигателя необходимо усовершенствовать систему топливоподачи, а также систему смазки таким образом, чтобы избежать попадания угольной пыли в масло.

В настоящее время активные экспериментальные исследования по использованию твердого топлива в двигателях внутреннего сгорания проводятся различными компаниями такие как Зульцер, Дженерал Электрик, Купер-Бессемер и др. Стоит также отметить, что Купер-Бессемер исследует дизельные двигатели, предназначенные для стационарных установок. Основная цель исследования разработать систему топливоподачи, при которой будет происходить полное сжигание частиц угольного топлива. Также активные работы проводятся на Аляске. Исследования проводились с использованием 18-цилиндрового дизельного двигателя мощностью 9,6 МВт. Главной целью работы является доказательство того, что ДВС проработает в течении четырех тысячи часов на водоугольной суспензии, имея при этом термический КПД около 41 %. Также ожидается, что применение ВУТ позволит снизить выбросы оксидов азота на 50 %, оксидов серы на 70 % и оксида углерода на 25 % [5].

Как уже было сказано, применение угольного топлива имеет существенные недостатки. Перспективно применять в двигателях внутреннего сгорания водоугольные суспензии (ВУС) или водоугольное топливо (ВУТ).

Не менее актуальным являются экспериментальные исследования, направленные на оценку влияния различных факторов на процессы тепломассопереноса и характеристики зажигания частиц водоугольного топлива. Авторами работы [6] проведено экспериментальное исследование времени задержки зажигания одиночной капли водоугольного топлива по сравнению с движущейся в потоке каплей при равных условиях (состав топлива, размер и форма капель, температура окислителя). Экспериментальное исследование проводилось на установке, представленной на рисунке 1. Капля топлива впрыскивалась в камеру сгорания. Воздух подавался воздуховодами 4. Температура окислителя варьировалась в пределах от 600-800 К. Скорость движения потока составляла 3 м/с.

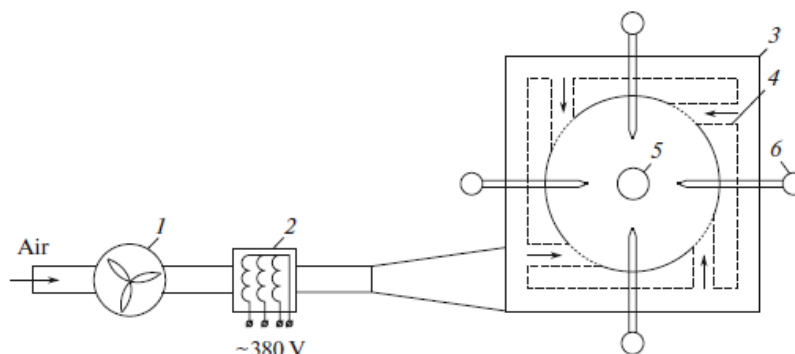


Рисунок 1 – экспериментальная установка с вихревой камерой сгорания:

- 1 – вентилятор; 2 – воздухонагреватель; 3 – вихревая камера сгорания;
4 – воздуховод; 5 – отверстие для выхода газов; 6 – термопара.

Авторами работы представлена траектория движения капли в камере сгорания. Nakoryakova V. E. и др. [6] определили время задержки зажигания капли. Установлено, что время задержки зажигания капли, закреплённой в

камере сгорания в 2-3,5 раза ниже, чем находящейся в потоке нагретого воздуха.

Также проводятся исследования на выявление экономической обоснованности применения ВУТ. Крайнюк А. И. и др. [7] провели комплексную оценку эффективности использования топлив растительного происхождения в дизельных двигателях внутреннего сгорания. Авторы работы вычислили прямые и косвенные затраты на производство вырабатываемой двигателем единицы энергии с учетом эксплуатационных издержек. Установлено, что по мере удорожания традиционных источников энергии, таких как нефть, экономическая целесообразность применения новых органических суспензионных топлив неуклонно возрастает.

В работе [8, 9] авторами проведено экспериментальное исследование и математическое моделирование процессов тепломассопереноса в водоугольной частице в газотурбинной установке. Авторы работы решали уравнения закона сохранения массы, энергии. Также авторами учтены процессы термического разложения органической части топлива. Поставленная задача решалась методом конечных разностей с применением локально-одномерной схемы А. А. Самарского. Экспериментальное исследование проводилось на установке, представленной на рисунке 2. Сыродой С. В. и др. [8, 9] представили сравнение экспериментальных результатов и теоретических данных и установили, что при достаточно низких температурах разность этих результатов существенна. Также авторами доказано, что с уменьшением температуры окислителя температура зажигания становится идентичной для капель топлива разных размеров.

Также крупные экспериментальные исследования проведены Франком Робеном [10] на модернизированном двигателе внутреннего сгорания. Изучение процессов тепломассопереноса в двигателе внутреннего сгорания проводились через стеклянные вставки, вмонтированные в ДВС. Регистрация процессов зажигания происходила с помощью высокоскоростной камеры.

Автором исследовались параметры зажигания частиц ВУТ. Франк Робен установил, что в ДВС капли ВУТ могут стабильно воспламеняться и гореть.

Авторами работы [11, 12] проводились экспериментальные исследования одноцилиндрового двигателя внутреннего сгорания. При проведении эксперимента применялись суспензии с различным составом на основе угля, нефти, сажи и др. Установлено, что состав топлива значительно влияет на содержание вредных выбросов в отработавших газах. В [11, 12] пришли к выводу, что оптимальный состав топлива, при котором выбросы минимальные – 50% угольной пыли, 30 % воды и 20 % дизельного топлива.

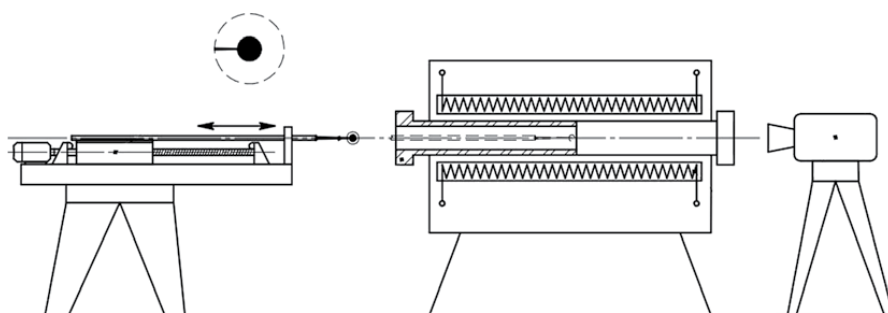


Рисунок 2 – Экспериментальная установка: 1 – капля ВУТ; 2 – координатное устройство перемещения; 3 – полый керамический цилиндр; 4 – скоростная видеокамера; 5 – электронагреватель; 6 – керамический стержень.

В работах [13, 14, 15] проведено экспериментальное исследование характеристик двигателя внутреннего сгорания, работающего на водоугольной суспензии. Экспериментальное исследование проводилось на установке, спроектированной по схеме Патрахальцева Н.Н. [15]. Подача топлива осуществлялась через патрубки. Авторами установлено, что при применении водоугольной суспензии в ДВС наблюдалась нестабильность в процессе воспламенения и сгорания, что приводило к непредвиденным вспышкам топлива. Доказано, что тепловых условий при малых нагрузках двигателя недостаточны для стабильного горения ВУТ.

Hsu B.D. [16] исследовал характеристики зажигания водоугольного топлива в условиях соответствующих камер сгорания ДВС. Экспериментальное исследование проводилось при различных условиях: 1) воспламенение топлива от сжатия поршня; 2) отдельный впрыск дизельного топлива и ВУТ для зажигания угольной суспензии; 3) впрыск ВУТ. Автором установлено, что выбросы оксида азота уменьшились, выбросы сажи незначительно увеличились. Также в [16] доказано, что при сжигании ВУТ выбросы СО и НС увеличились.

Stuart [17] провел экспериментальное исследование характеристик зажигания и сгорания водоугольного топлива в дизельном двигателе. Автором изучено влияние свойств топлива (давление, температура ВУТ на входе в ДВС, размер частиц и распределение частиц по размерам) на характеристики воспламенения. Stuart провел экспериментальное исследование на установке ДВС. Впрыск топлива происходил при максимальной производительности двигателя. Автором установлено, что повышение начального давления и температуры окислителя перед впрыском улучшает характеристики зажигания топлива. Также к уменьшению времени зажигания приводит добавление небольших количеств дизельного масла. Доказано, что суспензии с более мелкими частицами угольного топлива имеют низкие времена задержки зажигания и высокую тепловую эффективность.

Urban и др. [18] провели экспериментальное исследование характеристик зажигания водоугольного топлива по сравнению с дизельным топливом. Эксперимент проводился на двухтактном двигателе внутреннего сгорания с внутренним диаметром 216 мм (900 об/мин). Авторами проведена оценка производительности и количества выбросов. В [18] установлено, что количество выбросов оксидов азота (NO_x) снижается приблизительно на 50 %, в то время как общее содержание углеводородов было на 50 % выше, чем у дизельного топлива. Авторами также установлено, что для улучшения характеристик сжигания водоугольного топлива необходимо модернизировать ДВС, а именно систему топливоподачи. Также предложено 4

способа увеличения эффективности сгорания топлива: 1) увеличение температуры и давление в цилиндре ДВС; 2) увеличение степени сжатия поршня; 3) тепловая изоляция камеры сгорания; 4) улучшение циркуляции воздуха в цилиндре ДВС.

В работе [19] авторами был успешно проведен эксперимент по сжиганию водоугольной суспензии в двухцилиндровом двигателе внутреннего сгорания. Uzkan T. и др. исследовали влияние характеристик двигателя на процесс зажигания частицы ВУС. Эксперимент проводился в течение 3,5 часов при различных режимах работы двигателя (350 об/мин и 900 об/мин). Авторами установлено, что характерное влияние на процессы зажигания оказывает момент впрыска топлива в ДВС. Также доказано, что воспламенение топлива начинается при температуре 800-900 К. Также в [19] заключили, что при впрыскивании дизельного топлива тепловая эффективность ДВС возрастает. Это обусловлено тем, что при сгорании дизельного топлива общее выделение тепла возрастает.

Hsu B. D. [20] провел оценку рабочих характеристик двигателя, выбросов и параметров сгорания водоугольного топлива в двухцилиндровом дизельном двигателе. Экспериментальное исследование проводилось на установке диаметром 229 мм, а скорость составляла 1050 об/мин. В суспензии содержалось 50% угля, средний размер частиц составлял около 2,88 мкм. При проведении исследования автором предложены 3 метода зажигания ВУС в двигателе, о котором было сказано ранее [16]. Автором работы установлено, что максимальная скорость тепловыделения у водоугольного топлива выше, чем у дизельного. Это приводит к увеличению давления в цилиндре двигателя и происходит практически полное сгорание топлива. Hsu B.D. доказал, что на вязкость водоугольной суспензии оказывает влияние не только распыл, но и перемешивание топлива.

Кроме того, в работе [21] предложена новая система впрыска угольных топлив в ДВС. В качестве системы топливоподачи авторами работы предложена автоматическая форсунка. Авторами замечено, что при

применении автоматической форсунки характерное время задержки зажигания уменьшается за счет увлечение давления с 27,6 – 53,7 МПа. Hsu B.D. установил, что при такой системе впрыска топлива происходит полное сгорания ВУТ в условиях частичной нагрузки. Авторы заключили, что для достижения лучших результатов при работе двигателя на полной нагрузке требуется улучшить насосную систему. В продолжении исследований сгорания водоугольных топлив авторами работы [22] проведено экспериментальное исследование сгорания ВУТ. В качестве экспериментальной установки применялся двухступенчатый дизельный двигатель. Давление в ДВС варьировалось от 1 до 3,2 МПа, температура изменялась в диапазоне от 700 до 1400 К. Авторами установлено, что время задержки зажигания зависит от начальных условий, а именно от давления и температуры окислителя. Также в [22] установлено, что при данных условиях скорость тепловыделения топлива значительно ниже, чем у дизельного. Это обусловлено скорее всего неполным сгоранием водоугольной суспензии. Siebers D. L. и др. заключили, что с увеличением плотности и давления воздуха характерное время задержки зажигания уменьшается. Авторы установили, что минимальная температура необходимая для полного сгорания суспензии составляет около 800 К.

Также проведены исследования по определению выбросов при сжигании ВУТ по сравнению с дизелем. Benedek K. R. и др. [23] измерили выбросы отработавших газов. Эксперимент проводился в одноцилиндровом двигателе внутреннего сгорания, работающего на водоугольном топливе. Диаметр выхлопной трубы составлял 33 см. Для снижения выбросов оксидов азота авторами применялось дожигание топлива. Для сокращения выбросов углеводорода ими применялись два метода:

1. низко- и высокотемпературное впрыскивание сорбентов кальция для улавливания SO_2 ;
2. высокотемпературные фильтры для контроля мелких частиц.

В [23] установлено, что при применении дизельного топлива выбросы NO_x составляют 1400 мг/л, а для ВУТ-1250 мг/л. Выбросы угарного газа при сжигании ВУТ составляют 100-180 мг/л, в то время, как при сжигании дизеля 345 мг/л.

1.2 Теоретические исследования процессов воспламенения капель водоугольного топлива

Немало работ [24-39] посвящено теоретическому исследованию процесса горения водоугольного топлива в котельных агрегатах, газовых турбин и двигателей внутреннего сгорания [24]. Так в работе [8] Syrodoy S. и др. провели математическое моделирование процессов тепломассопереноса водоугольной частицы в условиях электроискрового нагрева. Авторами работы решались основные уравнения закона сохранения массы и энергии. Распределение давления по частице определялось из уравнения пьезопроводности. В модели учитывался процесс термического разложения частицы. Математическая задача решалась методом конечных разностей в среде программирования Matlab. Авторы работы представили зависимость времени задержки зажигания (τ) от силы тока (I). Установлено, что при увеличении I с 60 до 220 А τ уменьшается в 1,2-2 раза. В работе установлено, что уменьшение диаметра частицы с 1,5 мм до 0,5 мм приводит к уменьшению времени задержки зажигания с 0,04 с до 0,01 с.

Также проводятся численные исследования, посвященные воспламенению одиночных капель водоугольной суспензии, движущихся в высокотемпературном потоке воздуха [24-26]. В работе [24] проведено математическое моделирование процессов тепломассопереноса капли водоугольного топлива в потоке высокотемпературного окислителя. Авторами работы решалась система дифференциальных уравнений, записанная в безразмерных переменных в сферической системе координат.

В [24] решено уравнение энергии с учетом основных термодимических и физических процессов (удаления влаги, термическое разложение, фильтрация водяных паров сквозь угольный каркас). Теплофизические характеристики топлива определялись с учетом фронта испарения с учетом объемных долей компонентов топлива. Авторами работы также решалось уравнение энергии для газовой области. Для нахождения распределения давления вдоль радиуса частицы авторами решено уравнение пьезопроводности. Также для каждого компонента реакции решалось уравнение диффузии. Уравнения решались методом конечных разностей с использованием неявного четырехточечного разностного шаблона. Математическая модель верифицирована на экспериментальных данных. Результаты показали хорошее соответствие. Авторами установлено, что значение времени задержки зажигания описывается полиномиальной кривой. Также в [24] представлены распределения температур водоугольной частицы при температуре окислителя 873 К и установлено, что с увеличением скорости окислителя общее время воспламенения частицы возрастает. В [25] представлена математическая модель воспламенения капли ВУТ. Она включает в себя основные уравнения массы, импульса и энергии. В модели предполагается, что летучие газы, состоящие из метана, выдуваются на поверхность частицы. Поставленная задача решается методом произвольного Лагранжиана-Эйлера. Скорость летучего газа определяется по E_x-CPD модели. Верификация математической модели проводилась с использованием экспериментальных данных. Они показали хорошее соответствие. В работе установлено, что при сгорании частицы после удаления летучих из ВУТ образуются смешанные и диффузионные области горения. Газовая фаза воспламеняется на границе этих областей, а пламя распространяется к частице. Авторами статьи доказано, что сферические и сфероидальные частицы имеют одинаковую природу воспламенения. В статье [26] также проведено экспериментальное исследование процесса воспламенения капель водоугольного топлива. На основании экспериментальных данных разработана математическая модель

процессов термической подготовки топлива. Математическая постановка задачи соответствует [25]. Авторы работы выделили 6 характерных этапов горения топлива (инертный нагрев, испарение, термическое разложение органической части топлива, зажигание и сгорание летучих компонентов, воспламенения и сжигание кокса). Также в статье представлена зависимость времени задержки зажигания от размера частиц. Проведен сравнительный анализ экспериментальных результатов и численного моделирования. Они показали хорошее соответствие. Авторы пришли к выводу, что разработанная математическая модель обладает хорошим прогностическим потенциалом.

Численное исследование процессов тепломассопереноса проведено в [27]. Salomatov V. и др. [27] провели математическое моделирование процессов зажигания и горения частицы водоугольного топлива в условиях высоких температур. Авторами работы решено уравнение энергии для угольной частицы с учетом термохимических взаимодействий водяного пара и углерода, термического разложения, а также движение водяных паров сквозь угольный каркас. Также авторами работы учтено влияние теплоты от держателя, на котором подвешена капля ВУТ. Как и в [24] решено уравнение диффузии для каждого компонента реакции. Теплофизические характеристики топлива рассчитаны с учетом объемных долей компонента. Поставленная математическая задача решалась методом конечных разностей. Верификация математической модели проводилась путем сравнения времени задержки зажигания с экспериментальными значениями. Результаты показали хорошее соответствие. Авторами работы установлено, что при температуре окислителя около 900 К происходит практически шестикратное ускорение зажигания капли ВУТ. Также Salomatov V. и др. представили распределение температур в частице топлива в момент воспламенения.

Работа [28] посвящена изучению влияния степени метаморфизма угля на характеристики и условия зажигания водоугольных капель. Математическая постановка задачи соответствует [27]. Но в работе [28] авторами также решено уравнения пьезопроводности при движении водяных

паров сквозь угольный каркас. Поставленная задача решалась методом конечных разностей. Верификация математической модели проводилась с использованием экспериментальных данных. Авторами установлено, что в условиях высоких температур окислителя ($T_e \geq 873$ К) времена задержки зажигания капель ВУТ для углей различных марок различаются несильно (порядка 10 %). При низких температурах наоборот. В [28] доказано, что капли ВУТ на основе антрацитов и полуантрацитов воспламеняются быстрее других углей. Также авторами работы представлены распределения температур на поверхности капли при различных T_e .

Кузнецов Г. В. и др. в [29] провели численное исследование влияния диффузии продуктов пиролиза на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива. Авторами работы решались нестационарные дифференциальные уравнения энергии для начального состояния водоугольного топлива и «обезвоженной» части угля. В [29] учтено движение водяных паров и продуктов пиролиза сквозь угольный каркас. Для расчёта скорости испарения авторы применяли молекулярную теорию. Распределение температуры в газовой области определяется по уравнению энергии, которое учитывает экзотермические эффекты реакций окисления горючих компонентов. Распределение давления по радиусу частицы определялось по уравнению пьезопроводности. В [29] учтен процесс пиролиза, который описывается уравнением химической кинетики для органической части топлива. Сформулированная краевая задача решалась методом конечных разностей. Верификация математической модели проводилась методом сравнительного анализа с экспериментальными данными. Кузнецов Г. В. и др. представили распределение температуры на поверхности частицы, в системе «водоугольная частица-газовая среда» в момент воспламенения, а также в момент зажигания кокса при различных диаметрах капли. В [29] установлено, что воспламенение летучих происходит на расстоянии, равном половине диаметра капли топлива от поверхности частицы. Авторами доказано, что наиболее продолжительный процесс в термической подготовке топлива

является испарения воды из-за высокого эндотермического эффекта (2,5 МДж/кг).

В работе [30] проведено теоретическое и экспериментальное исследование процесса воспламенения водоугольных частиц, покрытых тонкой пленкой. Экспериментальное исследование зажигания капель ВУТ проведено на установке, представленной на рисунке 3. Частица топлива, закрепленная на координатном держателе вводилась в керамический цилиндр, который нагрет до 1270 К. Математическая постановка задачи включает в себя уравнения энергии для пленки воды. Авторами предполагалось, что градиент температуры вдоль радиуса основного топлива не оказывает существенного влияния на процесс теплопередачи в водной пленке. Поставленная задача решалась квазистационарным подходом. Верификация математической модели проводилась с использованием экспериментальных данных. Авторами работы установлено, что в условиях высоких температур внешней среды размер частицы оказывает несущественное влияние на динамику испарения воды. Salomatov V. A. и др. доказали, что в условиях низких температурах ($T_e \leq 873$ К) динамика испарения существенно отличается от испарения воды при $T_e \geq 1273$ К.

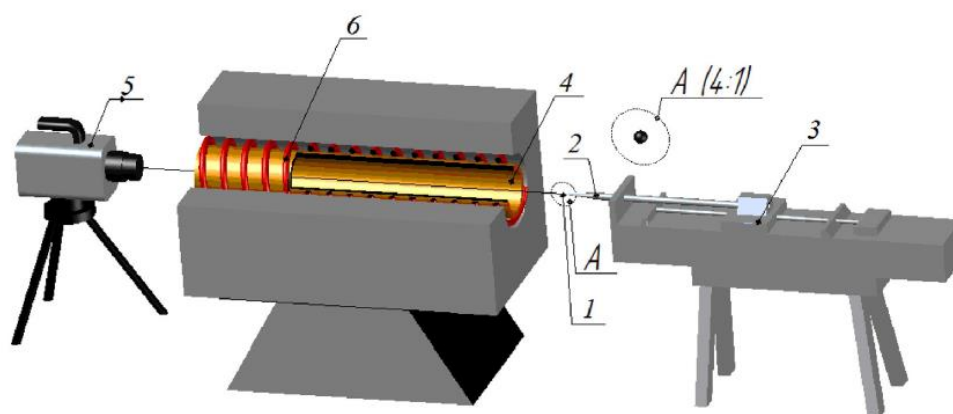


Рисунок 3 – экспериментальная установка: 1 – водоугольная частица; 2 – металлический держатель; 3 – координатное устройство; 4 – полая керамическая труба; 5 – высокоскоростная видеокамера; 6 – электронагреватель [30]

В [30] представлены зависимость времени испарения водной пленки от размера частицы ВУТ. Установлено, что при высокой температуре нагрева $T_e \geq 873$ К продолжительность процесса испарения водной пленки может составлять до 60 % от общего периода индукции. В статье [31] Syrodoy S. V. и др. оценили влияние неоднородности структуры водоугольных капель на характеристики процесса воспламенения (время задержки зажигания) в высокотемпературной среде. Установка для проведения эксперимента представлена на рисунке 3. Математическая постановка задачи включает в себя основные уравнения закона сохранения энергии для водоугольной частицы и газовой области. Также для каждого соответствующего компонента реакции решалось уравнение концентрации. В задаче учтены основные процессы тепломассопереноса, а именно теплопроводность, фильтрация водяных паров и зажигание частицы ВУТ. Существенная особенность работы заключается в том, что применялись различные математические модели для определения теплофизических параметров. Математическая модель с соответствующими краевыми условиями решалась методом конечных разностей в среде программирования Matlab. Авторы работы проанализировали влияние формы, конфигурации и размера пор капли на тепловые характеристики ВУТ. Установили, что эффективная теплопроводность топлива изменяется при различных способах описания теплофизических свойств. Syrodoy S. V. и др. доказали, что увеличение плотности и пористости частицы при термическом разложении приводит к более высоким значениям коэффициента теплопроводности. При проведении численного исследования определены времена задержки зажигания частиц ВУТ. Авторами работы [30, 31] установлено, что даже при максимально возможном коэффициенте теплопроводности отклонение времени задержки зажигания от средних значений не превышает 13 %.

В настоящее время [32, 33, 37] актуальным являются теоретические и экспериментальные исследования процессов тепломассопереноса в одиночных каплях ВУТ при применении в котельных агрегатах средней и

малой мощности. В статье [32, 33] представлено экспериментальное и численное исследование основных характеристик водоугольного топлива. Экспериментальное исследование проводилось на опытном промышленном котле, приспособленном для сжигания водоугольного топлива. Математическая постановка задачи включает в себя описание фазового движения несущей фазы (многокомпонентная неизотермическая среда), а также учитывает перенос излучения, движения капли/ частицы, сгорания в газовой среде, выгорание остатков кокса. Поставленная задача решалась методом конечных элементов в программном обеспечении ansys fluent. Для верификации математической модели применялись экспериментальные данные. Авторы работы представили распределения температур и скоростей в различный момент времени. Также доказали, что коэффициент избытка воздуха является надежным параметром при выборе сухого или жидкого удаления шлака. Также авторами работы доказано, что разработанная математическая модель обладает высоким прогностическим потенциалом.

В работе [34] проведено математическое моделирование процесса воспламенения одиночных водоугольных капель и оценено влияние эффекта поглощения термического излучения в поверхностной водной пленке на характеристики и условия зажигания. В работе [34] рассмотрены совокупные физические (инертный нагрев, испарение водной пленки) и термохимические (термическое разложение и воспламенения) процессы. Syrodoy S. V. и др. решали систему нестационарных дифференциальных уравнений энергии для однородного угля, пленки воды. Для органической части топлива рассматривали уравнение термического разложения. Поставленная математическая задача решалась методом конечных разностей. Авторами доказано, что толщина пленки воды оказывает значительное влияние на характеристики и условия воспламенения. В [34] представлены зависимость времени испарения частицы от температуры окружающей среды при различной толщине пленки. Syrodoy S. V. и др. доказали, что время испарения

водной пленки может занимать до 60 % от общего периода воспламенения топлива.

В работе [35] представлено большинство известных исследований по теме инициации процессов сгорания водоугольных топлив. Авторами работы рассмотрены как теоретические исследования, так и математические модели. В работе [35] определены основные эффекты и факторы (такие как соотношения смешивания, качество помола, температура окислителя, свойства компонентов, способ приготовления топлива и т.д.), оказывающие влияние на инерцию и стабильность зажигания капель ВУТ. В исследовании [36] проведено теоретическое и экспериментальное исследование процесса зажигания водоугольной суспензии в воздухе и в кипящем слое котельного агрегата. Авторами статьи решались уравнения энергии для водоугольной капли топлива. Масса выделяющейся влаги определялась по закону сохранения массы. Сформулированная задача решалась методом контрольных объемов. Верификация математической модели проводилась на экспериментальных данных. В [36] установлено, что вода в суспензии усиливает процесс сгорания, что приводит к снижению температуры воспламенения. Авторы показали, что частицы угля в капле ВУТ расположены неравномерно. Более крупные образуют группы внутри суспензии, а мелкие на краю. Это оказывает значительное влияние на процессы тепломассопереноса капель топлива. По результатам эксперимента установлено, что после испарения влаги частицы угля достигают температуры плавления и слипаются, образуя угольную оболочку.

Одним из способов инициации процесса горения водоугольного топлива является добавление нефтепродуктов [19, 37]. В [37] проведено экспериментальное и численное исследование макроскопических закономерностей воспламенения ВУС, содержащей нефтехимические вещества. Авторами работы проведено экспериментальное исследование и получено время задержки зажигания и продолжительность полного сгорания капель ВУС. По результатам эксперимента разработана математическая

модель тепломассопереноса, включающая уравнение энергии для капли ВУТ. В модели учитывался процесс термического разложения органической части топлива. Скорость фильтрации водяных паров сквозь угольный каркас определялась по закону Дарси. Распределение давления рассчитывалось с использованием уравнения пьезопроводности. При проведении исследования установлено, что для всех топливных композиций можно выделить несколько типичных стадий горения: 1. Инертный нагрев смеси (от 0 до 1 с); 2. Испарение жидких легковоспламеняющихся (нефть, нефтепродукты и т.д.) и невоспламеняющихся компонентов (вода) (от 1 до 7 с); 3. Гетерогенное зажигание топлива (от 7 до 10 с); 4. Вымирание фронта горения (более 25 с).

Авторами работы [38] проведено экспериментальное и теоретическое исследование закономерностей физико-химических превращений в процессе теплового воздействия на частицу водоугольного топлива при различных характеристиках топлива и основных параметров окислителя. Авторы статьи представили зависимость температуры окислителя на динамику образования парогазовой фазы водоугольного топлива, полученного из антрацита. По представленным данным установлено, что при температуре выше 50 °С начинается процесс интенсивного парообразования. В диапазоне температур от 50-100 °С процесс парообразования является доминирующим. В этом диапазоне температур происходит увеличение скорости выделения газообразных продуктов реакции. По проведенному исследованию установлено, что в интервале температур от 150-200 °С происходит улучшение реологических свойств топлива, это приводит к изменению структуры органической части ВУТ.

На настоящее время проводят также теоретические исследования, посвященные оценке влияния коэффициента фильтрации смеси газообразных продуктов пиролиза [39]. Математическая модель соответствует ранее представленным [26-31]. Эти модели представлены в виде систем нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих основные процессы тепломассопереноса, которые происходят

в течение индукционного периода. Верификация математической модели проводилась с использованием экспериментальных данных. По проведенному теоретическому и экспериментальному исследованию авторами установлено, что фильтрация водяного пара и летучих компонентов является значительным фактором (влияние до 40 %), влияющим на характеристики и условия воспламенения капель ВУТ. В [39] доказано, что более высокая скорость потока парогазовой смеси через пористый каркас приводит к более длительной задержки зажигания.

Несмотря на проведенные широкомасштабные теоретические и экспериментальные исследования процессов воспламенения частиц водоугольного топлива на настоящий момент времени не разработана физическая теория и обеспечивающая ее математическая база процессов воспламенения и горения капель водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания ДВС.

Поэтому целью настоящей работы является экспериментальное исследование и математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса, протекающих совместно при зажигании капель водоугольного топлива в условиях, соответствующих поршневым камерам двигателей внутреннего сгорания при радиационно-кондуктивно-конвективном и микроволновом нагреве при адиабатном сжатии.

2. Экспериментальное исследование

Экспериментальные исследования процессов воспламенения капель ВУТ проводились на установке, представленной на рисунке 4. Экспериментальный стенд обеспечивает достаточно низкий уровень погрешности (менее 10 %) при регистрации основных параметров (время задержки зажигания) процесса воспламенения.

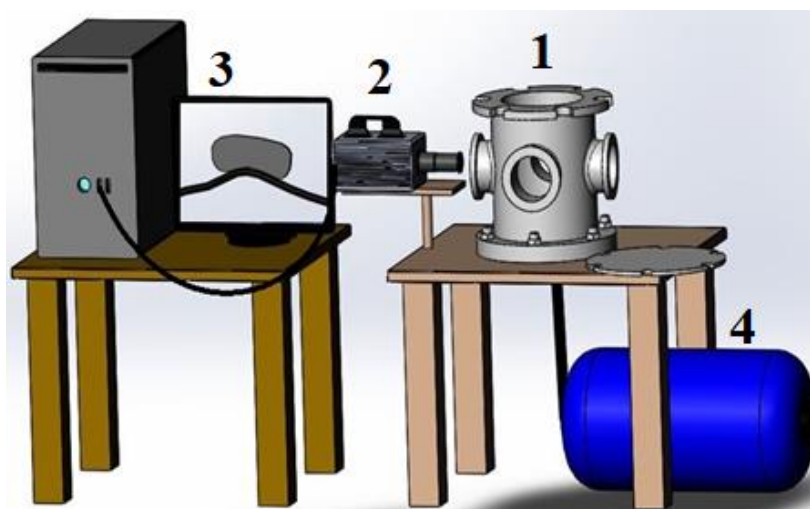


Рисунок 4 — схема экспериментальной установки: 1 – камера сгорания (КС); 2 – высокоскоростная видеокамера; 3 – ПК; 4 – компрессор

Капля водоугольного топлива размещалась на металлической проволоке, которая находится в камере сгорания 1. Частица ВУТ нагревалась электрическим нагревателем до высоких температур. Регистрация характерного времени задержки зажигания проводилось с помощью высокоскоростной видеокамерой Photron FASTCAM SA4 5 (скорость видеосъемки до 20 000 кад/с) 2. Обработка данных с видеокамеры осуществлялась на переносном компьютере 3. Давление окислителя внутри КС изменялось в диапазоне от 0,1 до 0,5 МПа. Сила тока (I) на металлической проволоке изменялась в пределах $6 < I < 18$ А. Систематическая погрешность определения времени задержки зажигания (τ) составляла не более 5 %.

Период времени от ввода частицы в камеру сгорания (начало теплового воздействия) до появления пламени (зажигание) считался временем задержки зажигания (воспламенения).

3. Модель зажигания капли водоугольного топлива

3.1 Физическая модель горения капли водоугольного топлива в условиях электроискрового нагрева

Физическая модель процессов тепло- и массопереноса представлена на рисунке 5.

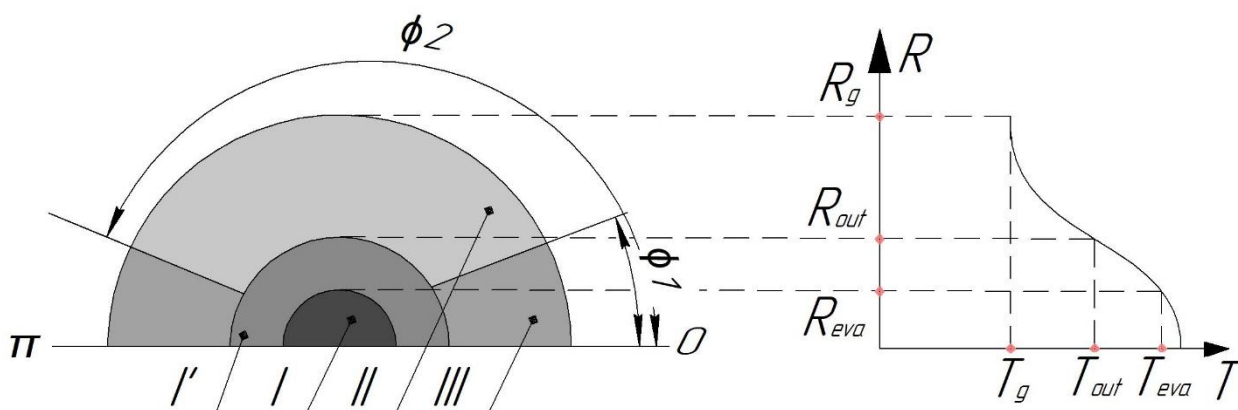


Рисунок 5 - область решения: I - область влагонасыщенного топлива (исходное состояние); I' - область «обезвоженного» угля; II - газовая область; III – электрод.

Капля водоугольного топлива попадает в межэлектродное пространство (рисунок 5) камеры сгорания ДВС. Электроискровое и радиационно-кондуктивно-конвективное воздействие приводит к увеличению температуры капли. В результате инициируется процесс испарения воды. Дальнейший нагрев приводит к формированию неоднородной структуры с различными теплофизическими характеристиками. Дальнейшее увеличение температуры приводит к процессу термического разложения органической части водоугольного топлива. Продукты пиролиза совместно с парами воды фильтруются сквозь угольный каркас на поверхность частицы. В пограничном слое последние образуют парогазовую смесь.

При разработке математической модели приняты следующие допущения:

1. Частица топлива имеет сферическую форму;
2. Водоугольная суспензия изотропная;
3. Принята простая кинетическая схема термохимического реагирования основных компонентов летучих с окислителем с брутто-реакциями;
4. Теплофизические характеристики не зависят от давления;
5. Теплофизические характеристики электрода не зависят от температуры.

3.2 Математическая модель горения капли водоугольного топлива в условиях электроискрового нагрева

Математическая постановка задачи зажигания частиц водоугольного топлива соответствует сформулированной физической постановке (рисунок 5) и включает систему нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных.

Уравнение энергии для частицы ВУТ с учетом физико-химических превращений и электроискрового нагрева:

$$\begin{aligned}
 & c_1(T_1) \cdot \rho_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \tau} + (u_1 \cdot c_1(T_1) \cdot \rho_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} + \\
 & + v_1 \cdot \frac{c_1(T_1) \cdot \rho_1(T_1)}{r} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \varphi}) \cdot \vartheta(r, \varphi) = \\
 & = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \cdot \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \varphi} \right) - \\
 & - \frac{Q_{\text{исп}} \cdot W_{\text{исп}}}{h_d} \cdot \delta(r, \varphi) - Q_{\text{тр}} \cdot W_{\text{тр}} \cdot \vartheta(r, \varphi) + \sigma \cdot E^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\tau > 0, 0 < r < r_{\text{out}}, 0 < \varphi < \pi$$

где c – массовая изобарная теплоемкость, кДж/(кг·К);

ρ – плотность, кг/м³;

T – температура, К;

τ – время, с;

u, v – скорость водяных паров и парогазовой смеси по радиусу и углу, м/с;

r – радиус частицы, м;

φ – азимутальный угол, рад;

$\delta(r, \varphi)$ – функция Дирака;

$\vartheta(r, \varphi)$ – функция Хевисайда;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$Q_{\text{исп/тр}}$ – тепловой эффект химической реакции (испарение, термическое разложение), Дж/(кг·К);

$W_{\text{исп}}$ – массовая удельная скорость испарения, кг/(м²·с);

h_d – параметр размазывания, м;

$W_{\text{тр}}$ – скорость термического разложения топлива, кг/(м³·с);

σ – проводимость, 1/(Ом·м);

E^2 – квадрат напряженности электрического поля, В²/м².

Массовая удельная скорость испарения рассчитывается по формуле:

$$W_{\text{исп}} = W_0 \cdot \exp \left[\frac{Q_{\text{исп}} \cdot \mu \cdot (T - T_3)}{R \cdot T_3 \cdot T} \right], \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (2)$$

где W_0 – скорость испарения при температуре T_3 ;

μ – молярная масса водяного пара, кг/моль;

T_3 – температура тройной точки, К ($T_3 = 273,16$ К);

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

T – температура на границе испарения, К.

Разложение органической части топлива начинается при условиях (температура поверхности больше температуры термического разложения, $T \geq T_{\text{тр}}$). Процесс пиролиза описывается уравнением:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = (1 - \eta) \cdot k \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$
$$\tau > 0, 0 < r < r_{\text{out}}, 0 < \varphi < \pi, T \geq T_{\text{тр}}$$

где η – параметр выгорания;

k - предэкспонента химической реакции, 1/с;

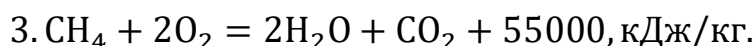
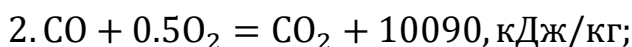
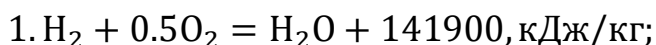
E – энергия активации, Дж/моль.

Скорость термического разложения рассчитывалась по формуле:

$$W_{\text{тр}} = V_0 \cdot (1 - \eta) \cdot k \cdot \rho_1 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}) \quad (4)$$

где V_0 – содержание летучих;

В работе учитывалось протекание трех наиболее значимых химических реакций:



Уравнение энергии для газовой области учитывает экзотермические эффекты реакций окисления основных горючих компонентов:

$$\begin{aligned} & c_2(T_2) \cdot \rho_2(T_2) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \tau} + u_2 \cdot c_2(T_2) \cdot \rho_2(T_2) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} + v_2 \cdot \frac{c_2(T_2) \cdot \rho_2(T_2)}{r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \varphi} = \\ & = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \cdot \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \varphi} \right) + \sum_{i=1}^{i=3} Q_{\text{хим}} \cdot W_{\text{хим}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\tau > 0, r_{\text{out}} < r < r_g, \varphi_1 < \varphi < \varphi_2$$

где $Q_{\text{хим}}$ – тепловой эффект химической реакции, Дж/кг;

$W_{\text{хим}}$ – скорость химической реакции, кг/(м³·с).

Скорость химической реакции рассчитывалась из математического закона Аррениуса:

$$W_{\text{хим}} = k_i \cdot c_i \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^n c_i \right) \cdot \rho_2 \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right), \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}) \quad (6)$$

где k_i – предэкспонента химической реакции, 1/с;

c_i – концентрация компонента, кг/кг;

E_i – энергия активации химической реакции, Дж/моль.

Уравнение энергии для электрода:

$$c_3 \cdot \rho_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial \tau} = \lambda_3 \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial T_3}{\partial \varphi} \right) \right) \quad (7)$$

$$\tau > 0, r_{\text{out}} < r < r_g, 0 < \varphi < \varphi_1, \varphi_2 < \varphi < \pi$$

Напряжение электрического поля определялось из уравнения для потенциала электрического поля:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} - \text{ctg} \varphi \frac{\partial U}{\partial \varphi} + r^2 \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} = 0 \quad (8)$$

$$\tau > 0, 0 < r < r_{\text{out}}, 0 < \varphi < \pi$$

где U – потенциал электрического поля, В.

Напряженность электрического поля вычислялась:

$$E = -\nabla U, E_r = -\frac{\partial U}{\partial r}, E_\varphi = -\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi} \quad (9)$$

Для определения концентрации горючих компонентов в пристенной области решалось уравнение диффузии для H_2 , CO , CH_4 , CO_2 , H_2O , O_2 :

$$\begin{aligned} \rho_2 \frac{\partial g_i}{\partial \tau} + \rho_2 \cdot u_2 \cdot \frac{\partial g_i}{\partial r} + \rho_2 \cdot \frac{v_2}{r} \frac{\partial g_i}{\partial \varphi} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot D_i \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial g_i}{\partial r} \right) + \\ + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \cdot D_i \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial g_i}{\partial \varphi} \right) - \sum_{i=1}^{i=3} W_{\text{хим}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\tau > 0, r_{\text{out}} < r < r_g, \varphi_1 < \varphi < \varphi_2$$

где g_i – массовая доля, кг/кг;

D_i – коэффициент диффузии соответствующего компонента реакции, m^2/c .

Распределение давления по радиусу в частице ВУТ описывалось уравнением пьезопроводности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \frac{k_p}{\mu \cdot \beta} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \cdot \frac{k_p}{\mu \cdot \beta} \cdot \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + \\ + \frac{W_{\text{тр}}}{\beta \cdot \rho_{H_2O}} \cdot \vartheta(r, \varphi) + \frac{W_{\text{исп}}}{s \cdot \beta \cdot \rho_{H_2O}} \cdot \delta(r, \varphi) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\tau > 0, 0 < r < r_{\text{out}}, 0 < \varphi < \pi$$

где P – пористость топлива;

k_p – коэффициент проницаемости, m^2 ;

μ – коэффициент динамической вязкости, $Pa \cdot s$;

β – коэффициент сжимаемости газообразных продуктов пиролиза, $1/Pa$;

s – размер пор, m ;

ρ_{H_2O} – плотность водяных паров, kg/m^3 ;

$\chi = \frac{k_p}{\mu \cdot \beta}$ – коэффициент пьезопроводности, m^2/s ;

Сформулированная система дифференциальных уравнений (1)-(11) решалась при следующих начальных и граничных условиях. Ниже представлены краевые условия для задачи, представленной на рисунке 5.

Начальные условия:

$$\begin{aligned} \tau = 0: T(r, \varphi) = T_0; U(r, \varphi) = 0; \eta(r, \varphi) = \eta_0; \\ p(r, \varphi) = p_{atm}; c_i(r, \varphi) = 0 \\ \text{при } 0 < r < r_g, 0 < \varphi < \pi \end{aligned} \quad (12)$$

Граничные условия для уравнения энергии:

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (13)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_g} = 0, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (14)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \text{при } 0 < r < r_g \quad (15)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \quad \text{при } 0 < r < r_g \quad (16)$$

Граничные условия для потенциала электрического поля:

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \tau > 0: U|_{r=r_{out}} = U, \\ \tau > 0: \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=r_{out}} = 0, \end{aligned} \quad \begin{aligned} \text{при } 0 < \varphi < \varphi_1, \varphi_2 < \varphi < \pi \\ \text{при } \varphi_1 < \varphi < \varphi_2 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \text{при } 0 < r < r_{\text{out}} \quad (19)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \quad \text{при } 0 < r < r_{\text{out}} \quad (20)$$

Граничные условия для уравнения диффузии:

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial r} \right|_{r=r_{\text{out}}} = -\frac{W_i}{\rho_g \cdot D_i}, \quad \text{при } \varphi_1 < \varphi < \varphi_2 \quad (21)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial r} \right|_{r=r_g} = 0, \quad \text{при } \varphi_1 < \varphi < \varphi_2 \quad (22)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\varphi_1} = 0, \quad \text{при } r_{\text{out}} < r < r_g \quad (23)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\varphi_2} = 0, \quad \text{при } r_{\text{out}} < r < r_g \quad (24)$$

где W_i – скорость выхода летучих компонентов, кг/(м²·с).

Граничные условия для уравнения пьезопроводности:

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (25)$$

$$\tau > 0: p|_{r=r_{\text{out}}} = p_{\text{atm}}, \quad \text{при } \varphi_1 < \varphi < \varphi_2 \quad (26)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \text{при } 0 < r < r_{\text{out}} \quad (27)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \quad \text{при } 0 < r < r_{\text{out}} \quad (28)$$

На границах с существенно отличающимися теплофизическими характеристиками задавалось граничное условие четвертого рода:

1. Для границы «частица ВУТ – газовая среда». На границе учитывается экзотермический эффект реакции углерода с окислителем ($r = r_{\text{out}}$, $\varphi_1 < \varphi < \varphi_2$):

$$\begin{cases} T_1(r_{\text{out}}, \varphi, \tau) = T_2(r_{\text{out}}, \varphi, \tau) \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} + Q_{\text{C+O}_2} \cdot W_{\text{C+O}_2} + \varepsilon_1 \sigma_{\text{сб}} (T_e^4 - T_{r=r_{\text{out}}}^4) \end{cases} \quad (29)$$

где $W_{\text{C+O}_2}$ – скорость реакции $\text{C+O}_2=\text{CO}_2+18,67$, кг/(м²·с);

ε_1 - приведённая степень черноты;

$\sigma_{сб}$ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴).

Скорость реакции $C+O_2=CO_2+18,67$ определялась по формуле:

$$W_{C+O_2} = k_{C+O_2} \cdot c_{O_2} \cdot \rho_2 \cdot \exp\left(-\frac{E_{C+O_2}}{RT}\right), \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (30)$$

2. Для системы «частица ВУТ – электрод» ($r = r_{out}$, $0 < \varphi < \varphi_1$, $\varphi_2 < \varphi < \pi$):

$$\begin{cases} T_1(r_{out}, \varphi, \tau) = T_3(r_{out}, \varphi, \tau) \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \end{cases} \quad (31)$$

3. Для системы «электрод – газовая среда» ($\varphi = \varphi_1$, $\varphi = \varphi_2$, $r_{out} < r < r_g$):

$$\begin{cases} T_2(r, \varphi, \tau) = T_3(r, \varphi, \tau) \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \end{cases} \quad (32)$$

3.3 Физическая модель горения водоугольного топлива в условиях микроволнового нагрева и адиабатного сжатия

Физическая постановка задачи (рисунок 5) обладает существенными ограничениями: 1. Во-первых, в реальных условиях практически невозможно создать условия, при которых происходит точное попадание одиночной капли топлива между двумя электродами. Также в условиях распыла капли водоугольного топлива не могут долго находиться в межэлектродном пространстве. Поэтому рассмотрена физическая постановка, представленная на рисунке 6. Частица водоугольного топлива (рисунок 6) попадает в камеру сгорания 3 ДВС (рисунок 7). В результате движения поршня 2 происходит адиабатное сжатие частицы ВУТ. Что приводит к увеличению давления и температура внутри камеры сгорания. Также при радиационно-конвективном и микроволновом воздействии частица начинает нагреваться. Это приводит к испарению воды. Фронт испарения смещается от поверхности нагрева вглубь капли. Это приводит к формированию угольного каркаса. Дальнейшее

увеличение температуры приводит к процессу термического разложения органической части топлива и выходу летучих компонентов. В результате, в пограничном слое образуется парогазовая смесь. При достижении определенных (критических) значений температур происходит зажигание смеси.

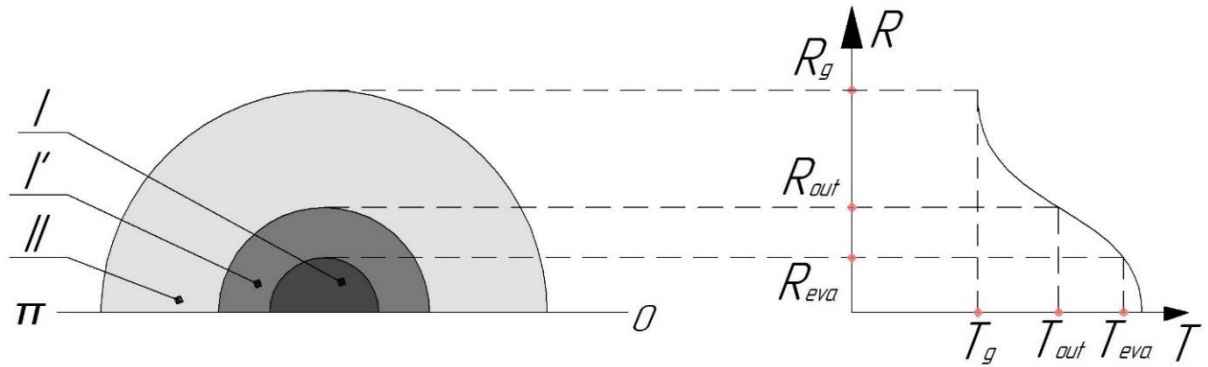


Рисунок 6 – область решения: I - область влагонасыщенного топлива (исходное состояние); I' - область «обезвоженного» угля; II - газовая область.

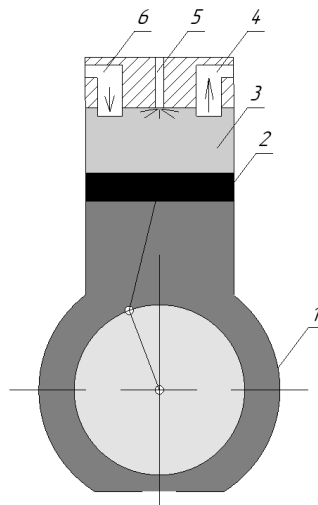


Рисунок 7 – поршневой двигатель внутреннего сгорания: 1 – цилиндр; 2 – поршень; 3 – камера сгорания; 4 – выпускной клапан; 5 – форсунка; 6 – впускной клапан

Период времени от начала теплового воздействия на частицу до начала интенсивного химического взаимодействия парогазовой смеси с окислителем является временем задержки воспламенения (зажигания).

Допущения, принятые при решении задачи соответствуют выше изложенным.

3.4 Математическая модель горения водоугольного топлива в условиях микроволнового нагрева и адиабатного сжатия

В классической теории теплопроводности предполагается, что скорость распространения тепла является бесконечно большой. При анализе быстропротекающих процессов зачастую необходимо учитывать конечность скорости распространения тепла. В этом случае закон сохранения Фурье принимает вид [40]:

$$\text{grad}T + \tau_1 \frac{\partial Q_T}{\partial \tau} = -Q_T \quad (33)$$

где τ_1 – время тепловой релаксации, с;

Q_T – тепловой поток, Вт.

Соответственно, уравнение теплопроводности становится гиперболическим [40]:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} + \tau_1 \frac{\partial^2 T}{\partial \tau^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (34)$$

Гиперболическое уравнение энергии для частицы ВУТ с учетом физико-химических превращений [40]:

$$\begin{aligned} & c_1(T_1) \cdot \rho_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \tau} + \frac{\lambda_1}{W_T^2} \frac{\partial^2 T_1}{\partial \tau^2} + \\ & + \left(u_1 \cdot c_1(T_1) \cdot \rho_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} + v_1 \cdot \frac{c_1(T_1) \cdot \rho_1(T_1)}{r} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \varphi} \right) \cdot \vartheta(r, \varphi) = \\ & = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \cdot \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \varphi} \right) - \\ & - \frac{Q_{\text{исп}} \cdot W_{\text{исп}}}{h_d} \cdot \delta(r, \varphi) - Q_{\text{тр}} \cdot W_{\text{тр}} \cdot \vartheta(r, \varphi) + q_{v0} \cdot \exp(-k_{\text{эм}} R) \end{aligned} \quad (35)$$

$$\tau > 0, 0 < r < r_{\text{out}}, 0 < \varphi < \pi$$

где W_T^2 – волновая скорость распространения тепла, м/с;

q_{v0} – текущая плотность внутреннего источника тепла, Вт/м³;

$k_{эм}$ – коэффициент поглощения углем электромагнитного излучения, 1/м.

Массовая удельная скорость испарения рассчитывается по формуле (2).

Процесс термического разложения описывается уравнением (3). Скорость термического разложения (4).

Распределение температуры в газовой области описывается дифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned} c_2(T_2) \cdot \rho_2(T_2) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \tau} + u_2 \cdot c_2(T_2) \cdot \rho_2(T_2) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} + v_2 \cdot \frac{c_2(T_2) \cdot \rho_2(T_2)}{r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \varphi} = \\ = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \cdot \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \varphi} \right) + \sum_{i=1}^{i=3} Q_{хим} \cdot W_{хим} \end{aligned} \quad (36)$$

$$\tau > 0, r_{out} < r < r_g, 0 < \varphi < \pi$$

Скорость химических реакций рассчитывалась из математического закона Аррениуса (6).

Уравнение диффузии для компонентов реакции:

$$\begin{aligned} \rho_2 \frac{\partial g_i}{\partial \tau} + \rho_2 \left(u_2 \cdot \frac{\partial g_i}{\partial r} + \frac{v_2}{r} \frac{\partial g_i}{\partial \varphi} \right) = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot D_i \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial g_i}{\partial r} \right) + \\ + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \cdot D_i \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial g_i}{\partial \varphi} \right) - \sum_{i=1}^{i=3} W_{хим} \end{aligned} \quad (37)$$

$$\tau > 0, r_{out} < r < r_g, 0 < \varphi < \pi$$

Распределение давления по радиусу в частице ВУТ описывалось уравнением пьезопроводности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \frac{k_p}{\mu \cdot \beta} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \cdot \frac{k_p}{\mu \cdot \beta} \cdot \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + \\ + \frac{W_{тр}}{\beta \cdot \rho_{H2O}} \cdot \vartheta(r, \varphi) + \frac{W_{исп}}{s \cdot \beta \cdot \rho_{H2O}} \cdot \delta(r, \varphi) \end{aligned} \quad (38)$$

$$\tau > 0, 0 < r < r_{out}, 0 < \varphi < \pi$$

Температура воздуха в конце процесса адиабатного сжатия определялась:

$$\frac{T_0}{T_K} = \left(\frac{P_0}{P_K}\right)^{\frac{k_{ад}-1}{k_{ад}}} \quad (39)$$

где T_0 – начальная температура, K ;

T_K – температура в конце процесса сжатия, K ;

$k_{ад}$ – показатель адиабаты;

P_0 – начальное давление, Па;

P_K – давление в конце процесса сжатия, Па.

Сформулированная система дифференциальных уравнений (35)-(39) решалась при следующих начальных и граничных условиях. Ниже представлены краевые условия для задачи, представленной на рисунке 6.

Начальные условия:

$$\tau = 0: T(r, \varphi) = T_0; \eta(r, \varphi) = \eta_0; p(r, \varphi) = p_{atm}; g_i(r, \varphi) = 0 \quad (40)$$

при $0 < r < r_g, 0 < \varphi < \pi$

Граничные условия для уравнения энергии:

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (41)$$

$$\tau > 0: T|_{r=r_g} = T_K, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (42)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \text{при } 0 < r < r_g \quad (43)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \quad \text{при } 0 < r < r_g \quad (44)$$

Граничные условия для уравнения пьезопроводности:

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (45)$$

$$\tau > 0: p|_{r=r_{out}} = p_{atm}, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (46)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \text{при } 0 < r < r_{\text{out}} \quad (47)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \quad \text{при } 0 < r < r_{\text{out}} \quad (48)$$

Граничные условия для уравнения диффузии:

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial r} \right|_{r=r_{\text{out}}} = -\frac{W_i}{\rho_g \cdot D_i}, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (49)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial r} \right|_{r=r_g} = 0, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (50)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \text{при } r_{\text{out}} < r < r_g \quad (51)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \quad \text{при } r_{\text{out}} < r < r_g \quad (52)$$

Граничные условия 4 рода соответствуют (29).

Теплофизические характеристики водоугольного топлива для двух математических постановок рассчитывались по формулам:

$$\lambda_1^{-1} = \varphi_4 \cdot (\lambda_4)^{-1} + \varphi_5 \cdot (\lambda_5)^{-1} \quad (53)$$

$$\lambda_{1'}^{-1} = \varphi_5 \cdot (\lambda_5)^{-1} + \varphi_6 \cdot (\lambda_6)^{-1} \quad (54)$$

$$c_1 = g_4 \cdot c_4 + g_5 \cdot c_5 \quad (55)$$

$$c_{1'} = g_5 \cdot c_5 + g_6 \cdot c_6 \quad (56)$$

$$\rho_1 = \varphi_4 \cdot \rho_4 + \varphi_5 \cdot \rho_5 \quad (57)$$

$$\rho_{1'} = \varphi_5 \cdot \rho_5 + \varphi_6 \cdot \rho_6 \quad (58)$$

где φ – объемная доля соответствующего компонента топлива;

4 – вода; 5 – уголь; 6 – водяные пары.

Теплофизические характеристики парогазовой смеси рассчитывались по формуле:

$$\lambda_2^{-1} = \sum_{i=1}^{i=6} \varphi_i (\lambda_i)^{-1} \quad (59)$$

$$c_2 = \sum_{i=1}^{i=6} g_i c_i \quad (60)$$

$$\rho_2 = \sum_{i=1}^{i=6} \varphi_i \rho_i \quad (61)$$

Объемные доли компонентов парогазовой смеси вычисляются из их массовых долей [31]:

$$\varphi_i = \frac{(g_i/\rho_i)}{\sum_{i=1}^{i=6}(g_i/\rho_i)} \quad (62)$$

Коэффициент диффузии парогазовой смеси определялся по формуле:

$$D_i = \frac{(1 - g_i)}{\sum_{i=1}^{i=6}(g_i/D_i)} \quad (63)$$

Для проведения параметрического анализа сформулированные дифференциальные уравнения в частных производных (1)–(52) приводились к безразмерным переменным.

Для обезразмеривания уравнений вводились следующие критерии:

$$t = \frac{\tau}{\tau_0}, R = \frac{r}{r_0} \quad (64)$$

Для уравнений энергии:

$$\theta = \frac{T}{T_e}, C = \frac{c}{c_0}, \Lambda = \frac{\lambda}{\lambda_0}, P = \frac{\rho}{\rho_0}, W = \frac{u}{u_0}, V = \frac{v}{u_0}, \quad (65)$$

$$Fo = \frac{a_0 \cdot \tau_0}{r_0^2} \quad (66)$$

$$Pe = \frac{u_0 \cdot r_0}{a_0} \quad (67)$$

$$\Lambda_{\text{тепло}} = \frac{l^2}{W_T^2 \cdot \tau^2} \quad (68)$$

$$Pom_{\text{исп}} = \frac{Q_{\text{исп}} W_{\text{исп}} r_0^2}{h_0 T_e \lambda_0} \quad (69)$$

$$Pom_{\text{т.р.}} = \frac{Q_{\text{т.р.}} W_{\text{т.р.}} r_0^2}{T_e \lambda_0} \quad (70)$$

$$\text{Pom}_{\text{эм}} = \frac{\sigma_{\text{эм}} \cdot E^2 \cdot r_0^2}{T_e \lambda_0} \quad (71)$$

$$\text{Pom}_{\text{свч}} = \frac{q_{\text{v0}} \cdot \exp(-k_{\text{эм}} R) \cdot r_0^2}{T_e \lambda_0} \quad (72)$$

$$\Sigma \text{Pom}_{\text{хим}} = \frac{Q_{\text{хим}} W_{\text{хим}} r_0^2}{T_e \lambda_0} \quad (73)$$

Для уравнения диффузии:

$$D' = \frac{D}{D_0} \quad (74)$$

$$\text{Fo}^d = \frac{D_0 \cdot \tau_0}{r_0^2} \quad (75)$$

$$\text{Pe}_{\text{дифф}} = \frac{u_0 \cdot r_0}{D_0} \quad (76)$$

$$\Sigma \text{Pom}_{\text{дифф}} = \frac{\Sigma W_{\text{хим}} r_0^2}{\rho_g \cdot D_0} \quad (77)$$

Для уравнения пьезопроводности:

$$P' = \frac{p}{p_{\text{атм}}}, X = \frac{\chi}{\chi_0} \quad (78)$$

$$\text{Fo}^H = \frac{r_0^2}{\tau_0 \cdot \chi_0} \quad (79)$$

$$\text{Pom}_{\text{исп}}^{P'} = \frac{W_{\text{исп}}}{s \cdot \beta \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \frac{r_0^2}{\chi_0 \cdot p_{\text{атм}}} \cdot \delta(r, \varphi) \quad (80)$$

$$\text{Pom}_{\text{гр}}^{P'} = \frac{W_{\text{гр}}}{\beta \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \frac{r_0^2}{\chi_0 \cdot p_{\text{атм}}} \cdot \vartheta(r, \varphi) \quad (81)$$

Для уравнения потенциала электрического поля:

$$U' = \frac{U}{U_0} \quad (82)$$

Для граничных условий:

$$Ki = \frac{Q_{\text{C+O}_2} \cdot W_{\text{C+O}_2} \cdot r_0}{T_e \lambda_0} \quad (83)$$

$$Sk = \frac{\sigma_{сб} \cdot \varepsilon_1 \cdot T_e^3 r_0}{\lambda_0} \quad (84)$$

$$Ki^d = \frac{W_i \cdot r_0}{\rho_g \cdot D_0} \quad (85)$$

$$\theta_k = \frac{T_k}{T_e} \quad (86)$$

Уравнение энергии в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} & \frac{C_1(\theta_1)P_1(\theta_1)}{Fo_1} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} + \Lambda_{тепло} \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial t^2} + W_1 C_1(\theta_1)P_1(\theta_1)Pe \frac{\partial \theta_1}{\partial R} + \\ & + V_1 \frac{C_1(\theta_1)P_1(\theta_1)}{R} Pe \frac{\partial \theta_1}{\partial \varphi} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[\Lambda_1 R^2 \frac{\partial \theta_1}{\partial R} \right] + \\ & + \frac{1}{R^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\sin \varphi \Lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \varphi} \right] - Pom_{исп} \delta(r, \varphi) - Pom_{т.р.} \vartheta(r, \varphi) + \\ & + Pom_{эм} + Pom_{свч} \end{aligned} \quad (87)$$

где $\Lambda_{тепло}$ – тепловой импульс.

Уравнение химической кинетики записывается без изменений:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = (1 - \eta) \cdot k \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (88)$$

Уравнение энергии для газовой области:

$$\begin{aligned} & \frac{C_2(\theta_2)P_2(\theta_2)}{Fo_2} \frac{\partial \theta_2}{\partial t} + W_2 C_2(\theta_2)P_2(\theta_2)Pe \frac{\partial \theta_2}{\partial R} + V_2 \frac{C_2(\theta_2)P_2(\theta_2)}{R} Pe \frac{\partial \theta_2}{\partial \varphi} = \\ & = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[\Lambda_2 R^2 \frac{\partial \theta_2}{\partial R} \right] + \frac{1}{R^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\sin \varphi \Lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \varphi} \right] + \sum_{i=1}^{i=3} Pom_{хим} \end{aligned} \quad (89)$$

Уравнение энергии для электрода:

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\partial \theta_3}{\partial t} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \frac{\partial \theta_3}{\partial R} \right] + \frac{1}{R^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[R^2 \frac{\partial \theta_3}{\partial \varphi} \right] \quad (90)$$

Уравнение для потенциала электрического поля:

$$\frac{\partial^2 U'}{\partial \varphi^2} - \text{ctg} \varphi \frac{\partial U'}{\partial \varphi} + R^2 \frac{\partial^2 U'}{\partial R^2} = 0 \quad (91)$$

Уравнение диффузии для соответствующего компонента реакции в безразмерных переменных имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{Fo^d} \frac{\partial g_i}{\partial t} + W_2 P_2 Pe_{\text{дифф}} \frac{\partial g_i}{\partial R} + V_2 P_2 Pe_{\text{дифф}} \frac{1}{R} \frac{\partial g_i}{\partial \varphi} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[D' R^2 P_2 \frac{\partial g_i}{\partial R} \right] + \\ + \frac{1}{R^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[D' \sin \varphi P_2 \frac{\partial g_i}{\partial \varphi} \right] - \sum_{i=1}^{i=3} P_{\text{ом}_{\text{дифф}}} \end{aligned} \quad (92)$$

Уравнение пьезопроводности в безразмерных переменных:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Fo^H} \frac{\partial P'}{\partial t} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 X \frac{\partial P'}{\partial R} \right] + \frac{1}{R^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\sin \varphi \cdot X \cdot \frac{\partial P'}{\partial \varphi} \right] + P_{\text{ом}_{\text{исп}}}^{P'} + \\ + P_{\text{ом}_{\text{тр}}}^{P'} \end{aligned} \quad (93)$$

Начальные условия в безразмерных переменных:

$$\begin{aligned} t = 0: \theta(R, \varphi) = \theta_0; \eta(R, \varphi) = \eta_0; g_i(R, \varphi) = 0; \\ P'(R, \varphi) = P_0; U'(R, \varphi) = 0 \\ \text{при } 0 < R < R_g, 0 < \varphi < \pi \end{aligned} \quad (94)$$

Граничные условия в безразмерных переменных для уравнения энергии (рисунок 5):

$$t > 0: \left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=0} = 0, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (95)$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=R_g} = 0, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (96)$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \text{при } 0 < R < R_g \quad (97)$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \quad \text{при } 0 < R < R_g \quad (98)$$

Граничные условия для уравнения потенциала электрического поля (рисунок 5):

$$t > 0: \left. \frac{\partial U'}{\partial R} \right|_{R=0} = 0, \quad \text{при } \varphi_1 < \varphi < \varphi_2 \quad (99)$$

$$t > 0: U'|_{R=R_{\text{out}}} = 1, \quad \text{при } 0 < \varphi < \varphi_1, \varphi_2 < \varphi < \pi \quad (100)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial U'}{\partial R} \right|_{R=R_{out}} = 0, \quad \text{при } \varphi_1 < \varphi < \varphi_2$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial U'}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \text{при } R_{out} < R < R_g \quad (101)$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial U'}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \quad \text{при } R_{out} < R < R_g \quad (102)$$

Граничные условия для уравнения диффузии (рисунок 5) в безразмерных переменных:

$$t > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial R} \right|_{R=R_{out}} = Ki^d, \quad \text{при } \varphi_1 < \varphi < \varphi_2 \quad (103)$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial R} \right|_{R=R_g} = 0, \quad \text{при } \varphi_1 < \varphi < \varphi_2 \quad (104)$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \text{при } R_{out} < R < R_g \quad (105)$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0 \quad \text{при } R_{out} < R < R_g \quad (106)$$

Граничные условия в безразмерных переменных для уравнения энергии (рисунок 6):

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=0} = 0, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (107)$$

$$t > 0: \theta|_{R=R_g} = \theta_k, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (108)$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \text{при } 0 < R < R_g \quad (109)$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \quad \text{при } 0 < R < R_g \quad (110)$$

Граничные условия для уравнения диффузии (рисунок 6):

$$t > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial R} \right|_{R=R_{out}} = -Ki^d, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (111)$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial R} \right|_{R=R_g} = 0 \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (112)$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \text{при } R_{\text{out}} < R < R_g \quad (113)$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial g_i}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \quad \text{при } R_{\text{out}} < R < R_g \quad (114)$$

Граничные условия в безразмерных переменных для уравнения пьезопроводности (рисунок 5 и рисунок 6):

$$t > 0: \left. \frac{\partial P'}{\partial R} \right|_{r=0} = 0, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (115)$$

$$t > 0: P'|_{r=r_{\text{out}}} = 1, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi \quad (116)$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial P'}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \text{при } 0 < R < R_{\text{out}} \quad (117)$$

$$t > 0: \left. \frac{\partial P'}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \quad \text{при } 0 < R < R_{\text{out}} \quad (118)$$

На границах с существенно отличающимися теплофизическими характеристиками задавалось граничное условие четвертого рода в безразмерных переменных:

$$\begin{cases} \theta_i(R, \varphi, t) = \theta_j(R, \varphi, t) \\ \Lambda_i \frac{\partial \theta_i}{\partial R} = \Lambda_j \frac{\partial \theta_j}{\partial R} \end{cases} \quad (119)$$

где $i, j - 1..3$ параметр среды.

Условие для границы «частица ВУТ – газовая среда» в безразмерных переменных имеет вид:

$$\begin{cases} \theta_1(R, \varphi, t) = \theta_2(R, \varphi, t) \\ \Lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial R} = \Lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial R} + Ki_{C+O_2} + Sk(1 - \theta_{R=R_{\text{out}}})^4 \end{cases} \quad (120)$$

Система дифференциальных уравнений (87)-(120) решалась методом конечных разностей с применением четырех точечного разностного шаблона в соответствии с локально-одномерным методом А. А. Самарского [41]. Схема является абсолютно устойчивой и обладает свойством суммарной аппроксимации [42]. Полученные при дискретизации одномерные конечно-разностные аналоги решаются методом прогонки [41]. Уравнение потенциала

электрического поля решалось методом последовательных приближений [43]. Определение теплофизических свойств воды в состоянии насыщения проводилось с помощью WaterSteamPro расширения для программного комплекса Matlab.

3.5 Тестовые задачи процесса тепломассопереноса

Для подтверждения достоверности результатов, полученных при решении краевой задачи тепломассопереноса, проведена верификация математической модели на тестовых задачах [42].

3.5.1 Теплопередача в сплошном цилиндре

В задаче рассмотрен процесс теплопереноса в цилиндре. На рисунке 8 представлена геометрическая постановка задачи [42,44].

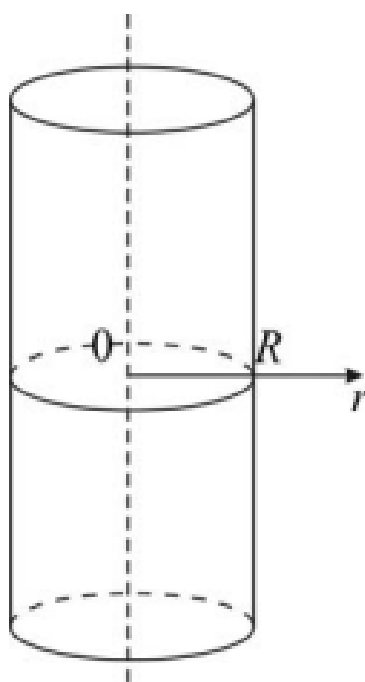


Рисунок 8 – Область решения [42]

Математическая постановка задачи имеет вид [42]:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right), 0 < r < R \quad (121)$$

Начальные и граничные условия имеют вид:

$t = 0: T = T_0, 0 \leq r \leq R;$ – начальное условие;

$r = 0: \frac{\partial T}{\partial r} = 0, t > 0;$ – граничное условие (левая граница);

$r = R: T = T_h, t > 0;$ – граничное условие (правая граница).

На рисунке 9 представлены результаты, полученные в [42] (а) и автором работы (б).

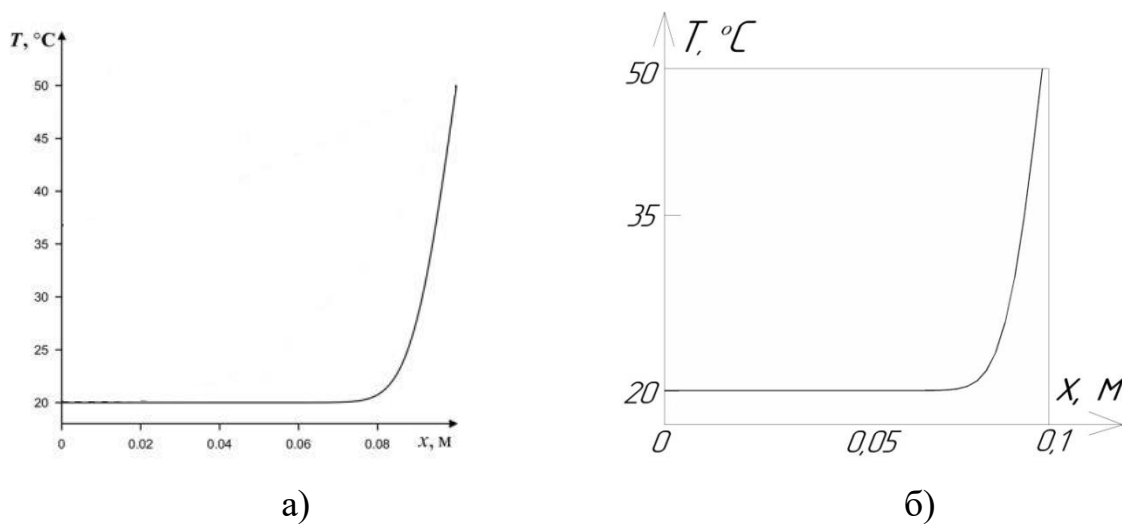


Рисунок 9 – полученные результаты:

а) распределение температур, полученные в [42]; б) распределение температур, полученные автором работы

3.5.2 Нестационарная задача теплопроводности в однородном сечении цилиндрической формы

Рассматривается двумерная задача теплопроводности. Необходимо определить температурное поле в горизонтальном цилиндре. На рисунке 10 представлена область решения.

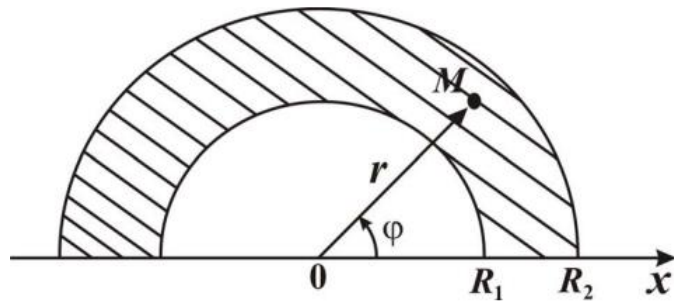
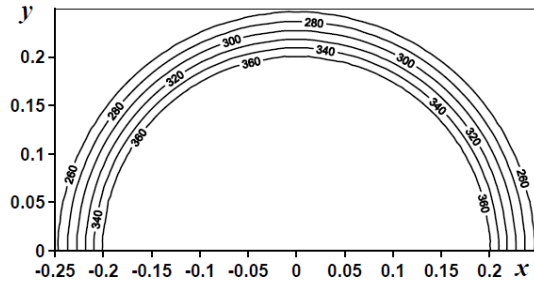
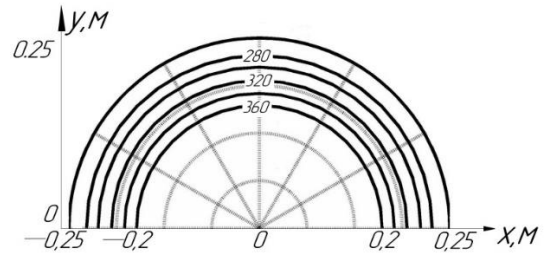


Рисунок 10 – Область решения [44]



а)



б)

Рисунок 11 – полученные результаты:

а) распределение температур, полученные в [44]; б) распределение температур, полученные автором работы

Математическая постановка задачи имеет вид [44]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{a}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{a}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2}, R_1 < r < R_2, 0 < \varphi < \pi \quad (122)$$

Начальные и граничные условия:

$t = 0: T = T_0, R_1 < r < R_2, 0 < \varphi < \pi$ – начальное условие;

$r = R_1: T = T_h, t > 0$; – граничное условие (внутренняя сторона цилиндра)

$r = R_2: T = T_c, t > 0$; – граничное условие (внешняя сторона цилиндра);

$\varphi = 0: \frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0, t > 0$; – условие симметрии;

$\varphi = \pi: \frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0, t > 0$; – условие симметрии.

На рис. 11 представлены результаты, полученные при решении тестовой задачи [44] (а) и автором работы (б).

По представленным данным можно сделать вывод о том, что метод решения и алгоритм работоспособен.

4 Результаты экспериментального и теоретического исследования характеристик процесса тепломассопереноса при зажигании капли водоугольного топлива

На характеристики и условия процесса тепломассопереноса частицы водоугольного топлива в условиях камер сгорания ДВС влияют различные факторы (сила тока на электроде, давление и температура окислителя, мощность внутреннего источника тепловыделения, начальная температура частицы). Ниже представлены результаты, полученные при проведении экспериментального исследования и математического моделирования при варьировании выше перечисленных параметров.

Математическое моделирование проводилось при параметрах, представленных в таблице 1, 2, 3, 4, 5.

Таблица 1 – теплофизические и термохимические характеристики угля [46]

Уголь	c_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	$Q_{тр}$, Дж/(кг)	V_0 , %
Бурый уголь	1150	0,151	1253	376,7	46

Таблица 2 – состав газообразных продуктов пиролиза [47, 48]

Компонент	Содержание компонента, %
CO ₂	19,5
CO	14,7
CH ₄	19,1
H ₂	9,4
N ₂	1

Таблица 3 – константы химических реакций [24]

Реакция	E_i , Дж/моль	k_i , 1/с (м/с)
Термическое разложение	$56,1 \cdot 10^3$	178
$H_2 + 0,5O_2 = H_2O$	$135 \cdot 10^3$	$1,13 \cdot 10^{17}$

Продолжение таблицы 3

$\text{CO} + 0.5\text{O}_2 = \text{CO}_2$	$200 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^{12}$
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	$55 \cdot 10^3$	$5,1 \cdot 10^{14}$
$\text{C} + 0.5\text{O}_2 = \text{CO}_2$	$133 \cdot 10^3$	$6,4 \cdot 10^4$

Таблица 4 – теплофизические характеристики газообразных продуктов пиролиза [49]

Газ	c_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³
H ₂ O	2352	0,187	0,202
CO	1247	0,081	0,241
H ₂	1552	0,57	0,0187
CH ₄	4153	0,144	0,224
CO ₂	1301	0,086	0,4077
N ₂	1215	0,072	0,260

Таблица 5 – коэффициенты диффузии [50]

Газ	D, м ² /с
H ₂ O → окислитель	$0,22 \cdot 10^{-4}$
CO → окислитель	$0,185 \cdot 10^{-4}$
H ₂ → окислитель	$0,63 \cdot 10^{-4}$
CH ₄ → окислитель	$0,196 \cdot 10^{-4}$
CO ₂ → окислитель	$0,14 \cdot 10^{-4}$
N ₂ → окислитель	$0,19 \cdot 10^{-4}$

4.1 Влияние мощности нагревательного элемента и давления окислителя на характеристики и условия зажигания водоугольной частицы

Важнейшими характеристиками, обуславливающими зажигание и горение ВУТ в камере сгорания ДВС является мощность нагревательного элемента (электрода) (Q) и давление окислительной среды (p_e). Выбор оптимальных значений обеспечивает стабильное воспламенение и полное

сгорание капель водоугольного топлива в условиях работы поршневых камер двигателей внутреннего сгорания.

Установлено, что при увеличении давления окислителя значение времени задержки зажигания (τ) частицы ВУТ возрастает во всем диапазоне Q . Это скорее всего обусловлено тем, что при увеличении давления окислителя также возрастает температура насыщения внутрипоровой влаги. Соответственно, необходимые условия для испарения воды (по температуре) достигаются позже, чем при атмосферном давлении.

При проведении экспериментального исследования доказано, что при увеличении мощности нагревательного элемента τ уменьшается во всем интервале p_e . Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных значений τ показывает их хорошее соответствие (в пределах доверительного интервала). Можно сказать, что разработанная математическая модель обладает достаточно высоким прогностическим потенциалом моделирования процессов зажигания капель ВУТ, в условиях камер сгорания ДВС.

4.2 Влияние температуры внешней среды на характеристики и условия зажигания водоугольной частицы при радиационно-кондуктивно-конвективном и электроискровом нагреве

Температура окислителя является одним из важнейших параметров, влияющим на условия и характеристики работы поршневого двигателя внутреннего сгорания.

При высокой температуре атмосферного воздуха происходит снижение мощности ДВС за счет уменьшения массовой подачи топлива. При низких температурах окислителя происходит замедленное повышение температуры сжимаемого воздуха, что приводит к ухудшению условий самовоспламенения. Поэтому температура воздуха является важным фактором, влияние которого необходимо исследовать.

Установлено, что в условиях электроискрового нагрева даже при относительно низких температурах окислителя частицы ВУТ могут стабильно воспламеняться. Доказано, что при высоких температурах окислителя электроискровой нагрев не оказывает существенного влияния на процесс термической подготовки капель водоугольного топлива, т.к. происходит газофазное воспламенение топлива.

На рисунке 12 представлены поля температур при $I=0,3$ А в различные моменты времени при варьировании $T_e = 473$ К (рисунок 12 – а, б, в) и $T_e = 673$ К (рисунок 12 - г, д, е). Можно отметить, что в начальный момент времени (рисунок 12 – а, г) в частице ВУТ формируется фронт испарения топлива на границе сопряжения двух электродов и водоугольной частицы. Это обусловлено тем, что теплофизические характеристики, а именно теплопроводность и теплоемкость электродов, имеют более высокие значения, чем капли водоугольного топлива. Также в области взаимодействия электродов локализуются тепловые источники, обусловленные электрическим нагревом.

При дальнейшем нагревании (рисунок 12 – б, д) начинается процесс интенсивного испарения воды из капли ВУТ. Происходит формирование существенно искаженного фронта испарения. Форма которого обусловлена распределением тепловых потоков в частице ВУТ. Дальнейший нагрев приводит к процессу термической деструкции и выходу летучих компонентов.

На рисунке 12 (д, е) в момент зажигания можно выделить зону воспламенения. В условиях низких температур $T_e < 500$ К рисунок 12 (д) воспламенение капель водоугольного топлива происходит на границе сопряжения электрода и водоугольной частицы. Это обусловлено тем, что при $T_e < 500$ К электроискровой нагрев оказывает существенное влияние на процесс термической подготовки капель водоугольного топлива. При этом водяные пары и парогазовая смесь формируют вблизи частицы область, препятствующую диффузии окислителя в зону высоких концентраций газообразных продуктов пиролиза. Также стоит отметить, что температура

водоугольной частицы $T > 373 \text{ K}$. Соответственно воспламенение топливной частицы начинается только после ее полного обезвоживания.

На рисунке 12 (е) можно выделить зону воспламенения, которая находится на некотором удалении (примерно в половину диаметра капли ВУТ). Скорее всего, это обусловлено тем, что процесс диффузии окислителя в область интенсивного взаимодействия газообразных продуктов пиролиза затруднён вследствие формирования водяного барьера.

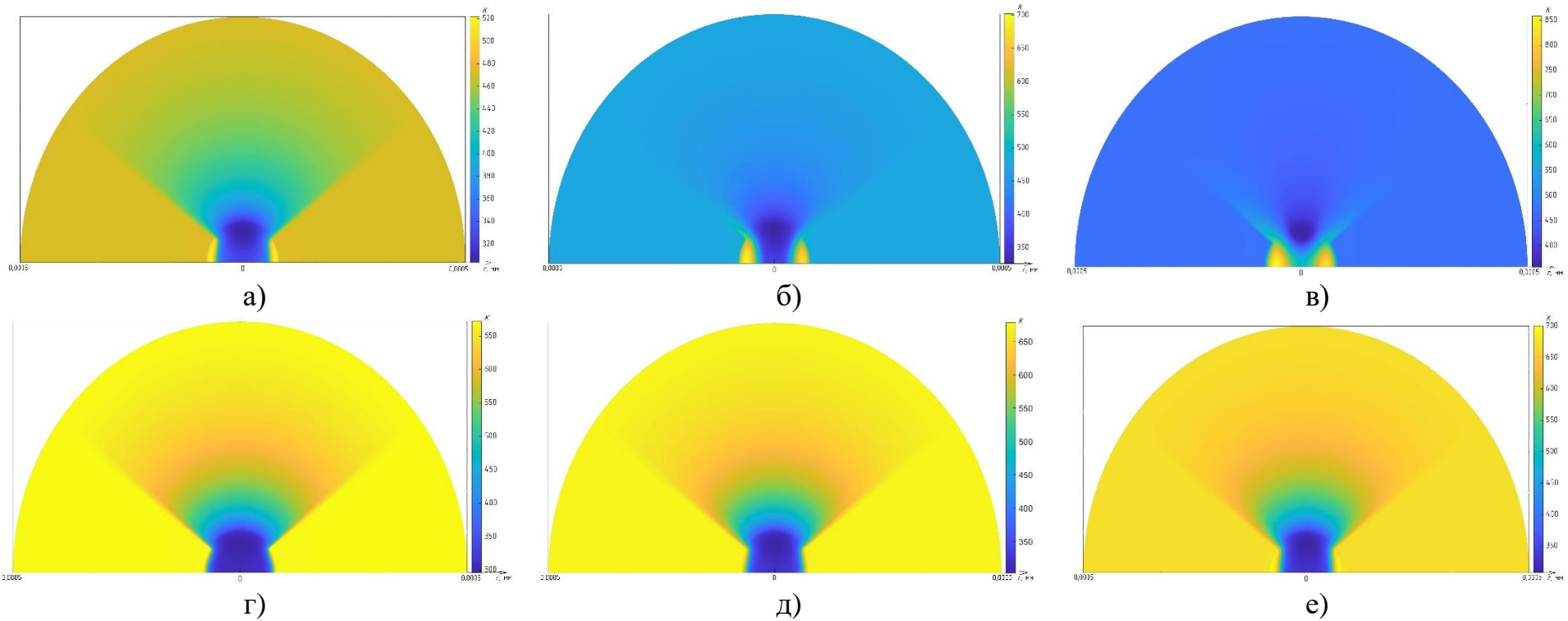


Рисунок 12 – распределение температур при $I=0.3$ А в различные моменты времени

при $T_e=473$ К (а, б, в): а – $\tau=0.1$ с; б – $\tau=0.2$ с; в – $\tau=0.3$ с;

при $T_e=673$ К (г, д, е): г – $\tau=0.04$ с; д – $\tau=0.08$ с; е – $\tau=0.1$ с;

4.3 Влияние конечного давления окислителя в условиях адиабатного сжатия на характеристики зажигания водоугольной частицы

Стоит отметить, что в условиях распыла капли водоугольного топлива не могут длительный период находиться в межэлектродном пространстве. Поэтому наиболее целесообразно исследовать влияния давления и температуры окислителя на процесс термической подготовки капель водоугольного топлива в условиях адиабатного сжатия. Известно, что на характеристики зажигания частиц ВУТ в условиях, соответствующих камерам сгорания ДВС существенное влияние оказывает конечное давление (P_k) и температура (T_k) окислителя в процессе адиабатного сжатия. Поэтому оценка влияния P_k и T_k на динамику термической подготовки ВУТ является важным параметром, требующего рассмотрения.

Установлено, что в условиях адиабатного сжатия при увеличении P_k характерное время задержки зажигания уменьшается. Это обусловлено тем, что при увеличении P_k в камере сгорания, температура сжатия возрастает. Доказано, что в условиях высоких температур окислителя, давление не оказывает существенного влияния на процессы термической подготовки капель водоугольного топлива.

На рисунке 13 представлены поля температур при $T_e=373$ К в различные моменты времени при $P_k = 12$ МПа (рисунок 13 – а, б, в) и $P_k = 20$ МПа (рисунок 13 – г, д, е). Можно отметить, что в начальный момент времени (рис. 13 – а, г) происходит формирование равномерного фронта испарения, движущегося к центру частицы. Дальнейший нагрев (рисунок 13 – б, д) приводит к процессу термического разложения топлива, выходу летучих компонентов и их концентрации в газовой области.

На рисунке 13 (д, е) можно отметить, что зона зажигания газообразных продуктов пиролиза находится на некотором удалении (примерно $0,5 \cdot d$ капли

ВУТ) от поверхности частицы. Как уже было сказано ранее, это скорее всего обусловлено тем, что водяные пары создают «барьер» для диффузии окислителя.

Также стоит отметить, что механизм процесса термической подготовки капель водоугольных топлив в интервале давлений $10 < P_k < 20$ МПа не имеет существенных отличий.

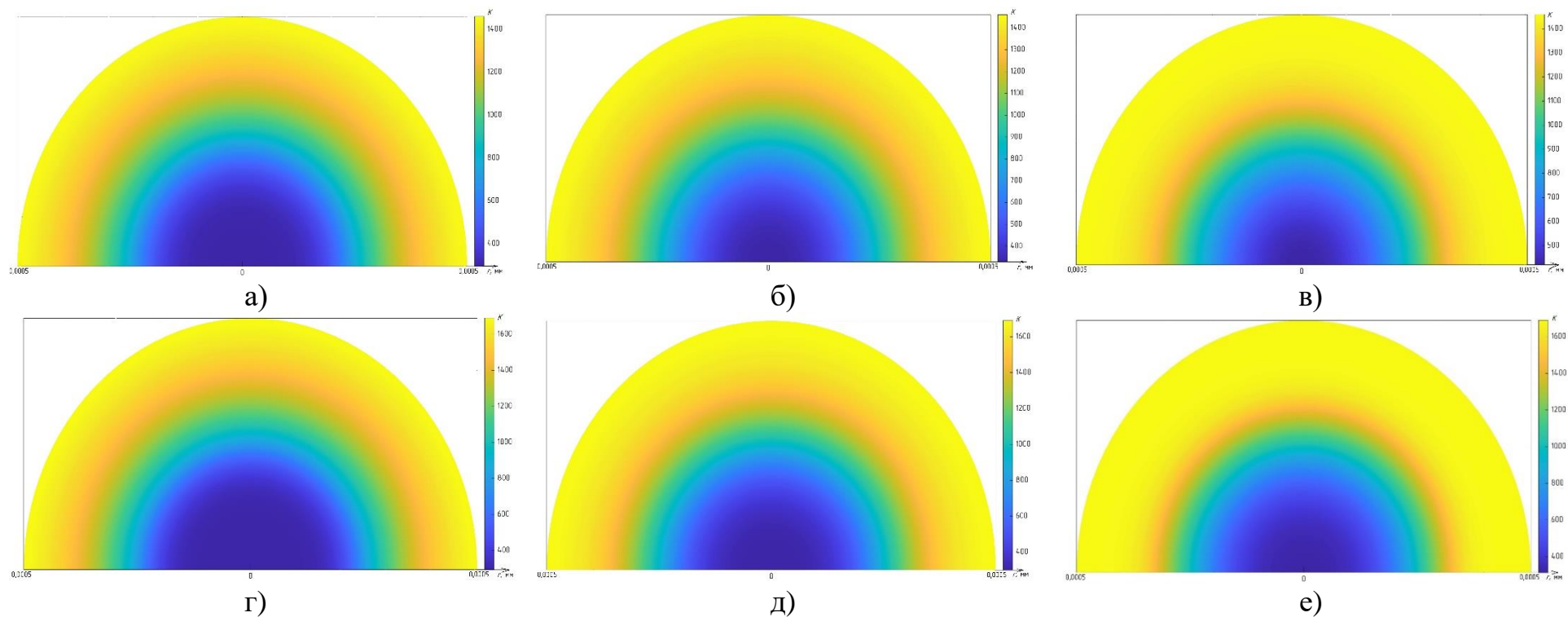


Рисунок 13 – распределение температур при $T_e=373$ К в различные моменты времени

при $P_k=12$ МПа (а, б, в): а – $\tau=0.3$ с; б – $\tau=0.6$ с; в – $\tau=0.9$ с;

при $P_k=20$ МПа (г, д, е): г – $\tau=0.2$ с; д – $\tau=0.4$ с; е – $\tau=0.5$ с;

4.4 Влияние мощности внутреннего источника тепловыделения на условия и характеристики зажигания водоугольной частицы в условиях адиабатного сжатия

Целесообразно нагревать частицы комбинированным источником теплового воздействия. Например, совместное воздействие радиационно-конвективного и микроволнового нагрева в условиях адиабатного сжатия.

На рисунке 14 (а, б, в) представлены поля температур при $T_e=373$ К и $P_k = 20$ МПа при различных мощностях внутреннего источника тепловыделений (q_{v0}) в момент воспламенения. По представленным данным видно, что при малых значениях q_{v0} воспламенение летучих происходит в непосредственной близости от частицы. С увеличением q_{v0} процессы термической подготовки топлива происходят быстрее, что приводит к существенному уменьшению времени задержки зажигания. Также стоит отметить, что при $q_{v0}=1 \cdot 10^{14}$ Вт/м³ происходит зажигание обезвоженной частицы водоугольного топлива. При $q_{v0}=1 \cdot 10^{15}$ Вт/м³ время задержки зажигания существенно уменьшается ($\tau_z = 3,7 \cdot 10^{-6}$ с). Это обусловлено скорее всего тем, что микроволновый нагрев оказывает существенное влияние на процессы термической подготовки ВУТ в условиях $T_e=373$ К и $P_k = 20$ МПа.

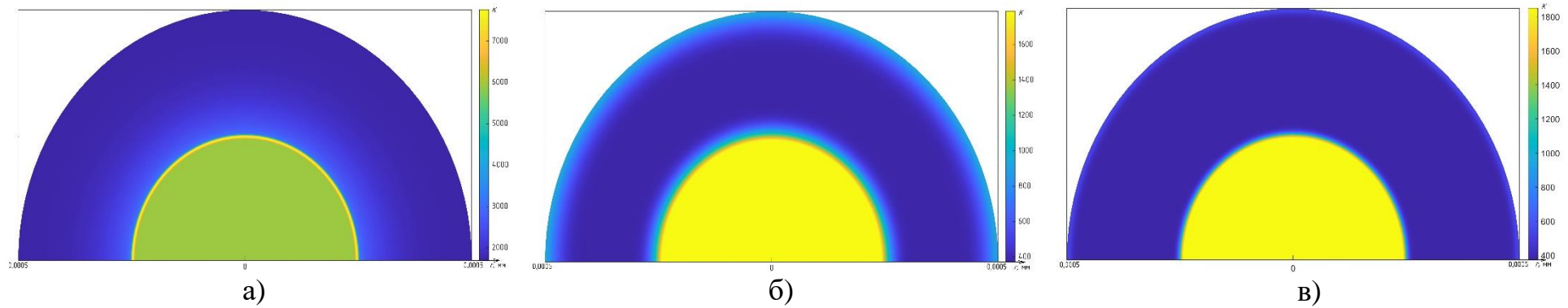


Рисунок 14 – распределение температур при $T_e=373$ К и $P_k=20$ МПа при различных значениях внутреннего источника тепловыделений: а – $q_{v0}=1 \cdot 10^{13}$ Вт/м³, $\tau_3 = 3,3 \cdot 10^{-4}$ с; б – $q_{v0}=1 \cdot 10^{14}$ Вт/м³, $\tau_3 = 3,5 \cdot 10^{-5}$ с; в – $q_{v0}=1 \cdot 10^{15}$ Вт/м³, $\tau_3 = 3,7 \cdot 10^{-6}$ с.

4.5 Влияние температуры частицы на условия и характеристики зажигания каплей ВУТ в метастабильном состоянии

При рассмотрении задач зажигания частиц водоугольного топлива важным фактором можно считать начальную температуру частицы при попадании в камеру ДВС. Также на продолжительность периода задержки воспламенения водоугольного топлива существенное влияние оказывают давление (P_e) и температуры (T_e) сжатого воздуха.

На рисунке 15 представлены поля температур при $T_e=1073$ К в момент воспламенения при различной начальной температуре частицы при $P_e=0,1$ МПа (рисунок 15 а – $T_q=293$ К ($\tau_z = 2,81$ с); б – $T_q=473$ К ($\tau_z = 1,55$ с); в – $T_q=573$ К ($\tau_z = 0,82$ с)) и $P_e=22$ МПа (рисунок 15 а – $T_q=293$ К ($\tau_z = 0,68$ с); б – $T_q=473$ К ($\tau_z = 0,36$ с); в – $T_q=573$ К ($\tau_z = 0,29$ с)). По представленным данным видно, что при малых значениях $P_e < 0,1$ МПа воспламенение происходит в газовой области ($r_{out} < r < r_g$). Нетрудно заметить, что температура на некотором удалении от частицы (примерно половину диаметра капли ВУТ) превышает T_q . Это, скорее всего, обусловлено высокой концентрацией продуктов пиролиза в этой области.

Можно отметить, что при давлении окислителя $P_e \approx 15$ МПа наблюдается зажигание частицы в области ($r \approx r_{out}$). Анализ представленных данных показывает, что при высоком давлении окислителя ($(P_e > 1,5$ МПа)) температура частицы выше 473 К ($T_q > 473$ К) не оказывает существенное влияние на динамику термической подготовки капель водоугольного топлива.

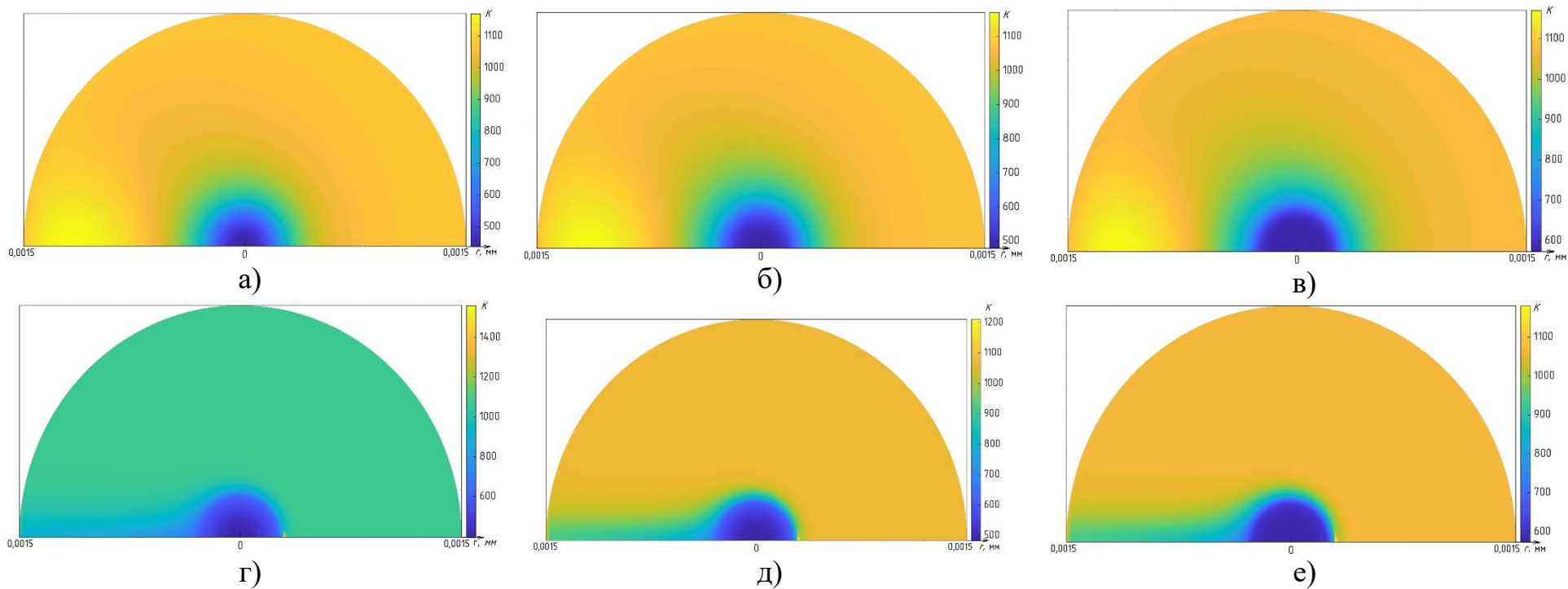


Рисунок 15 – распределение температур $T_e=1073$ К в момент воспламенения при различной температуре частицы (T_q) для различных давлений:

$P_e=0,1$ МПа: а – $T_q=293$ К ($\tau_3 = 2,81$ с); б – $T_q=473$ К ($\tau_3 = 1,55$ с); в – $T_q=573$ К ($\tau_3 = 0,82$ с);

$P_e=15$ МПа: а – $T_q=293$ К ($\tau_3 = 0,68$ с); б – $T_q=473$ К ($\tau_3 = 0,36$ с); в – $T_q=573$ К ($\tau_3 = 0,29$ с).

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ,
РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ83	Валиевой Лилии Евгеньевне

Подразделение	ИШЭ	НОЦ	И. Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Месячный оклад инженера – 17 000 р. Месячный оклад научного руководителя – 38 000 р.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Нормы амортизации – 20 %; накладные расходы – 70 %.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисление в социальные фонды 30,2 % от фонда заработной платы

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Планирование научных работ и оценка их выполнения
2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Составление сметы затрат на научное исследование
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Определение практической значимости проекта и себестоимости научного исследования на базе НИ ТПУ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	20.03.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Маланина Вероника Анатольевна	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ83	Валиева Лилия Евгеньевна		

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Темой выпускной работы является математическое моделирование процессов тепломассопереноса при зажигании частицы водоугольного топлива в двигателях внутреннего сгорания при различных давлениях окислителя. Целью работы является определение численно и экспериментально времени задержки зажигания водоугольного топлива при высоких давлениях окислителя в камерах сгорания ДВС.

С учетом проведенных работ выполнен раздел финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

5.1 Перечень работ и оценка времени их выполнения

В таблице 6 приведен полный перечень работ, количество исполнителей и время выполнения дипломного проекта.

Таблица 6 – перечень работ

№ п/п, наименование работы	Количество исполнителей	Продолжительность, дни
1. Выдача и получение задания;	Научный руководитель (НР)	1
	Инженер	1
2. Аналитический обзор литературы;	Инженер	17
3. Разработка физической модели;	Инженер	7
4. Разработка математической модели;	Инженер	20
5. Вывод математических коэффициентов;	Инженер	15
6. Решение задачи;	Инженер	15
7. Решение тестовых задач;	Инженер	3
8. Вычислительный эксперимент;	Научный руководитель	1
	Инженер	10

Продолжение таблицы 6

9. Анализ результатов;	Научный руководитель	1
	Инженер	10
10. Проведение экспериментального исследования;	Инженер	15
11. Оформление выпускной квалификационной работы;	Инженер	5
12. Проверка ВКР;	Научный руководитель	4
	Инженер	1
Итого:	НР-7 дней; Инженер – 119 дней.	

5.2 Смета затрат

Затраты на выполнение проекта рассчитываются по формуле:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з/пл}} + K_{\text{с.о.}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{накл}}, \text{ руб} \quad (123)$$

где $K_{\text{мат}}$ – материальные затраты, руб;

$K_{\text{ам}}$ – амортизация компьютерной техники, руб;

$K_{\text{з/пл}}$ – отчисления на заработную плату, руб;

$K_{\text{с.о.}}$ – затраты на социальные отчисления, руб;

$K_{\text{пр}}$ – прочие затраты, руб;

$K_{\text{накл}}$ – накладные расходы, руб.

5.2.1 Материальные затраты

Под материальными затратами понимается величина денежных средств, потраченных на канцелярские товары. Принимаются в размере 1000 руб. Также затраты на топливо принимаются в размере 1000 р. Итого материальные затраты составляют 2000 р.

5.2.2 Амортизация компьютерной техники и экспериментального оборудования

Амортизацию оборудования в классическом понимании можно назвать постепенным переносом стоимости основной части финансов организации и ее активов нематериального значения по уровню их морального и физического износа на итоговую цену выпускаемых товаров.

Амортизация компьютерной техники рассчитывается:

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт.}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{кт.}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}} = \frac{119}{365} \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{7} = 1\,164 \text{ руб/год.} \quad (124)$$

где $T_{\text{исп.кт.}}$ – время использования компьютерной техники (оборудования);

$T_{\text{кал}}$ – календарное время;

$C_{\text{кт.}}$ – цена компьютерной техники (оборудования), т.руб.;

$T_{\text{сл}}$ – срок службы, лет.

Экспериментальное оборудование включает в себя:

1. Нагревательная печь;
2. Высокоскоростная камера.

Амортизация экспериментального оборудования определяется по формуле (124):

$$K_{\text{ам (печь)}} = \frac{15}{365} \cdot 25 \cdot 10^4 \cdot \frac{1}{3} = 3\,424 \text{ руб/год.}$$

$$K_{\text{ам (камера)}} = \frac{15}{365} \cdot 8 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{5} = 6\,575 \text{ руб/год.}$$

Суммарные отчисления на амортизацию техники и оборудования:

$$\begin{aligned} K_{\text{ам}} &= K_{\text{ам(комп)}} + K_{\text{ам (печь)}} + K_{\text{ам (камера)}} = 1\,164 + 3\,424 + 6\,575 = \\ &= 11\,163 \text{ р/год.} \end{aligned}$$

5.2.3 Затраты на заработную плату

Заработная плата – это вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также выплаты компенсационного и стимулирующего характера.

Затраты на заработную плату рассчитываются:

$$K_{з/пл} = 3П_{инж}^{\phi} + 3П_{нр}^{\phi}, \text{ руб} \quad (125)$$

где $3П_{инж}^{\phi}$ – фактическая заработная плата инженера, руб;

$3П_{нр}^{\phi}$ – фактическая заработная плата научного руководителя, руб.

Месячный оклад:

$$3П_{инж/нр}^M = 3П_{0\text{ Инж/Нр}} \cdot K_1 \cdot K_2, \text{ руб} \quad (126)$$

где $3П_{0\text{ Инж/Нр}}$ – месячный оклад инженера, научного руководителя, руб;

K_1 – коэффициент, учитывающий премии, а также доплаты и надбавки, принимается равным 10%;

K_2 – районный коэффициент, принимается равным 30 %.

Тогда месячный оклад:

$$3П_{инж}^M = 3П_{0\text{ Инж}} \cdot K_1 \cdot K_2 = 17\,000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24\,310 \text{ руб.}$$

$$3П_{нр}^M = 3П_{0\text{ Нр}} \cdot K_1 \cdot K_2 = 38\,000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 54\,340 \text{ руб.}$$

Фактическая заработная плата:

$$3П_{инж/нр}^{\phi} = \frac{3П_{инж/нр}^M}{21} \cdot n^{\phi}, \text{ руб} \quad (127)$$

где 21 – среднее число рабочих дней в месяц, день;

n^{ϕ} – фактическое число дней в проекте, день.

Фактическая заработная плата для инженера:

$$3П_{инж}^{\phi} = \frac{3П_{инж}^M}{21} \cdot n^{\phi} = \frac{24\,310}{21} \cdot 119 = 137\,757 \text{ руб.}$$

Фактическая заработная плата для научного руководителя:

$$3П_{нр}^{\phi} = \frac{3П_{нр}^M}{21} \cdot n^{\phi} = \frac{54\,340}{21} \cdot 7 = 18\,113 \text{ руб.}$$

Затраты на заработную плату:

$$K_{з/пл} = 3П_{инж}^{\phi} + 3П_{Нр}^{\phi} = 137\,757 + 18\,113 = 155\,870 \text{ руб.}$$

5.2.4 Затраты на социальные отчисления

Отчисления на социальные нужды – обязательные отчисления по нормам, установленным законодательством государственного социального страхования в Фонд социального страхования РФ, Пенсионный фонд РФ, фонды обязательного медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, включаемых в себестоимость продукции (работ, услуг), по элементу «Затраты на оплату труда» (кроме тех видов оплаты, на которые страховые взносы не начисляются).

Плательщиками страховых взносов являются:

- 1) организации;
- 2) индивидуальные предприниматели;
- 3) физические лица.

Затраты на социальные нужды принимаются как 30,2 % от затрат на заработную плату.

Тогда затраты на социальные отчисления определяются:

$$K_{с.о.} = 0,302 \cdot K_{з/пл} = 0,302 \cdot 155\,870 = 47\,072,74 \text{ руб.} \quad (128)$$

5.2.5 Прочие затраты

Прочие затраты принимаются как 10 % от суммы материальных затрат, амортизационных отчислений, затрат на заработную плату и затрат на социальные нужды.

$$\begin{aligned} K_{пр} &= 0,1 \cdot (K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{з/пл} + K_{с.о.}) = \\ &= 0,1 \cdot (2\,000 + 11\,163 + 155\,870 + 47\,072,74) = 21\,610,6 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (129)$$

5.2.6 Накладные расходы

Накладные расходы – расходы на хозяйственное обслуживание производства и управление предприятием, являющиеся дополнительными к основным затратам и наряду с ними включаемые в издержки производства.

Накладные расходы принимаются в размере 70 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Тогда накладные расходы определяются как:

$$K_{\text{накл}} = 0,7 \cdot K_{\text{з/пл}} = 0,7 \cdot 155\,870 = 109\,109 \text{ руб} \quad (130)$$

Сведем все полученные данные в таблицу 7

Таблица 7 – смета затрат

Элементы затрат	Стоимость, руб.
1. Материальные затраты	2 000
2. Амортизация компьютерной техники и оборудования	11 163
3. Затраты на заработную плату	155 870
4. Затраты на социальные нужды	47 072,74
5. Прочие затраты	21 610,6
6. Накладные затраты	109 109
Итого:	346 825,34 руб.

Одним из наиболее перспективных топлив для замены традиционных источников энергии является водоугольное топливо (ВУТ). Оно обладает рядом преимуществ, во-первых, использование ВУТ приведет к значительному сокращению нефтяных ресурсов, а во-вторых использование водоугольного топлива в двигателях внутреннего сгорания позволяет уменьшить выбросы оксидов азота, серы и угарного газа. Установлено, что выбросы оксидов азота снижаются до 1250 мг/л, по сравнению с сжиганием дизельного топлива (выбросы составляют порядка 1450 мг/л), а угарного газа до 100-180 мг/л, в то время как при сжигания дизельного топлива выделяется 345 мг/л угарного газа. Но проведение экспериментальных исследований затруднительно из-за дороговизны экспериментальной установки и не полной

изученностью процессов зажигания и горения капель ВУТ. Поэтому математическое моделирование позволит установить основные закономерности процессов тепломассопереноса в частицах ВУТ, определить влияния основных факторов на время задержки зажигания, а также основные теплофизические свойства топлива.

Полученные результаты и разработанная теоретическая база смогут учитываться при проектировании новых двигателей внутреннего сгорания, работающих на водоугольном топливе.

Список использованных источников

1. Experimental study on ash content and calorific value of coal used in thermal power station / V. Balachandar, T. Ramkumar, B. Kalidasan, C. Subramaniyan // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – P.1-5.
2. Optimal design and thermo-economic analysis of an integrated power generation system in natural gas pressure reduction stations / Li Chenghao, Z. Siyang, L. Jie, Z. Zhiyong // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – № 200. – P.1-4
3. Ходаков Г. С. Водугольные суспензии в энергетике / Г. С. Ходаков // *Теплоэнергетика*. – 2007. – № 1. – С. 35-45
4. Редькина Н. И. Суспензионное угольное топливо для двигателей внутреннего сгорания / Н. И. Редькина, Г. С. Ходаков, Е. Г. Горлов // *Химия твердого топлива*. – 2013. – № 5. – С.54-61
5. Белоусов Е. В. Создание и совершенствование твердотопливных поршневых двигателей внутреннего сгорания / Е. В. Белоусов– Херсон: ОАО «ХГТ». – 2006. – 452 с.
6. Initiation of Organic Coal–Water Fuel Droplet Burning in a Vortex Combustion Chamber / V. E. Nakoryakov, D. O. Glushkov, P. A. Strizhak, S. V.Syrodoy // *Technical physics*. – 2017. – № 4. – P.176-179
7. Крайнюк А. И. Рабочие процессы ДВС / А. И. Крайнюк, И. П. Васильев // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2007. – № 2. – С.77-81
8. Mathematical modeling of the electric spark ignition of the coal-water particle fuel under conditions relevant to the internal combustion engines / S. Syrodoy, O. Penyazkov, M. Assad, N. Gutareva // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – № 92. – P.1-5
9. Влияние теплофизических свойств водугольного топлива на условия его воспламенения / С. В. Сыродой, Г. В. Кузнецов, А. В. Захаревич, В. В. Саломатов // *Химия твердого топлива*. – 2017. – № 3. – С.31-37.

10. Caton J.A. The Development of Coal-Fueled Diesel Engines: A Brief Review / J. A. Caton // Energy Information Annual. – 1992. – № 17. – P.89-97.
11. Slurry-fueled diesels seen beneficial to cogeneration // «Cogeneration». – 1985. – №4. – P. 11-12.
12. Cooper-Bessemer coal-fueled engine system – progress report / A. K. Rao, R. P. Wilson, E. N. Balles, R. A. Mayville, M. H. McMillian, J. A. Kimberley // ASME Transactions – Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1988. – №3. – P. 498-506
13. Sittauer H. Diesel eine erfindum erobert sich die welt / H. Sittauer // Transpress. – 1961. – P.95
14. Коллеров Л. К. Применение угольного топлива в дизелях / Л. К. Коллеров // Двигателестроение. – 1982. – № 2. – С.51-53
15. Atomization and Combustion of Carbon Slurry Fuels / T. W. Ryan, T. J. Callahan, L. G. Dodge, C. A. Moses // SAE Paper №821199. – 1982
16. Hsu B.D. Progress on the investigation of coal-water slurry fuel combustion in a medium speed diesel engine: Part 1—ignition studies / B. D. Hsu // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1988. – № 3. – P. 415-422
17. Bell S. R. Coal-fueled diesel engines analytical evaluations of ignition options / S. R. Bell, J. A. Caton //The Twenty-First (International) Symposium on Combustion. – 1986. – P. 389-397
18. Coal–water slurry operation in an EMD diesel engine / C. M. Urban, H. E. Mecredy, T. W. Ryan, M. N. Ingalls, B. T. Jett // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1988. – № 110. – P. 437-443
19. Uzkan T. Combustion of coal–water slurry in a two-cycle diesel engine effects of fuel amount and timing / T.Uzkan, C. E. Horton // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1990. – № 112. – P. 376-383
20. Hsu B.D. Progress on the investigation of coal–water slurry fuel combustion in a medium speed diesel engine: Part 2—Preliminary full load test / B.D. Hsu // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1988. – № 110. – P.423-430

21. Hsu B. D. Progress on the investigation of coal–water-slurry fuel combustion in a medium-speed diesel engine: Part 3—Accumulator injector performance / B. D. Hsu, G. L. Leonard, R. N. Johnson // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 1989. – № 111. – P.516-520

22. Siebers D. L. The auto-ignition and combustion of coal–water slurry under simulated diesel engine conditions / D. L. Siebers, T. M. Dyer // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 1986. – № 108. – P.654-660

23. Emission characteristics and control technology for stationary coal-fueled diesel engines / K. R. Benedek, K. T. Menzies, S. A. Johnson, R. P. Wilson, A. K. Rao, F. S. Schaub // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 1989. – № 111. – P.507-515

24. Effect of high-temperature gas flow on ignition of the water-coal fuel particles / V. Salomatov, G. Kuznetsov, S. Syrodoy, N. Gutareva // *Combustion and Flame*. – 2019. – № 203. – P.375-385

25. Direct numerical simulation of ignition of a single particle freely moving in a uniform flow / W. Zhang, H. Watanabe, T. Kitagawa // *Advanced Powder Technology*. – 2017. – № 28. – P.2893-2902.

26. Ignition of the Drops of Coal–Water Fuel in a Flow of Air / A. V. Zakharevich, V. V. Salomatov, P. A. Strizhak, S. V. Syrodoi // *Solid Fuel Chemistry*. – 2016. – № 3. – P.163-166

27. Ignition of coal-water fuel particles under the conditions of intense heat / V. V. Salomatov, G. V. Kuznetsov, S. V. Syrodoy, N. Y. Gutareva // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – № 106. – P.561-569.

28. Salomatov V. V. Influence of the degree of coal metamorphism on characteristics and conditions of ignition of coal-water fuel drops / V. V. Salomatov, G. V. Kuznetsov, S. V. Syrodoy // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2018. – №. 5.– P.1-16.

29. Кузнецов Г. В. Влияние диффузии продуктов пиролиза угля на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива /

Г. В. Кузнецов, В. В. Саломатов, С. В. Сыродой // Физика горения и взрыва. – 2018. – № 6. – С.30-40.

30. Mathematical and physical modeling of the coal–water fuel particle ignition with a liquid film on the surface / V. Salomatov, G. Kuznetsov, S. Syrodoy, N. Gutareva // Energy Reports. – 2020. – № 6. – P.628-643.

31. The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment / S. V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, A. V. Zhakharevich, N. Y. Gutareva, V. V. Salomatov // Combustion and Flame. – 2017. – № 180. – P.196-206

32. Analysis of Combustion of Coal-Water Fuel in Low-Power Hot-Water Boiler via Numerical Modeling and Experiments / S. V. Alekseenko, V. A. Kuznetsov, L. I. Mal'tsev1, A. A. Dekterev, M. Yu. Chernetskii // Journal of Engineering Thermophysics. – 2019. – № 2. – P.177-189.

33. Pneumatic Nozzle. RF Patent 2523816. – Byull. – 2014.– № 21. – P. 10.

34. Syrodoy S. V. Influence of absorption of thermal radiation in the surface water film on the characteristics and ignition conditions / S. V. Syrodoy, N. Y. Gutareva, R. I. Taburchinov // MATEC Web of Conferences. – 2016. – № 72. – P.1-6

35. Iegorov R.I. Review of ignition and combustion processes for water-coal fuels / R. I. Iegorov, P. A. Strizhak, M. Yu. Chernetskiy // EPJ Web of Conferences. – 2016. – № 110. – P.1-13

36. Kijo–Kleczkowska A. Combustion of coal–water suspensions / A. Kijo–Kleczkowska // Fuel. – 2011. – № 90. – P.865–877.

37. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects / D. O. Glushkov, S. V. Syrodoy, A. V. Zhakharevich, P. A. Strizhak // Fuel Processing Technology. – 2016. – № 148. – P.224–235

38. Pinchuk V. Physical and chemical transformations under the thermal action on coalwater fuel made of low-grade coal / V. Pinchuk // Thermal technology. – 2015. – P.1-7

39. Syrodoy S.V. Influence of filtration heat transfer on parameters and conditions for ignition of coal-water fuel particles / S. V. Syrodoy, V. V. Salomatov // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2019. – № 5. – P. 1-16
40. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва: Высшая школа, 1967. – 600 с.
41. Самарский А.А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва: Наука, 1977. – 656 с.
42. Кузнецов Г. В. Разностные методы решения задача теплопроводности. Учебное пособие / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
43. Пасконов В. М., Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В. М. Пасконов, В. И. Полежаев, Л. А. Чудов. – Москва: Изд-во Наука, 1984. – 288 с.
44. Шеремет М. А. Математическое моделирование и алгоритмизация задач теплоэнергетики / М. А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 50 с.
45. Kuznetsov G. V. Numerical Simulation of Ignition of Particles of a Coal–Water Fuel / G. V. Kuznetsov, V. V. Salomatov, S. V. Syrodoy // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2015. – № 4. – P.409- 415.
46. Агроскин А. А. Теплофизика твердого топлива / А. А. Агроскин, В. Б. Глейбман. – Москва. – Недра, 1980. – 128 с.
47. Химия и переработка угля / В. Г. Липович, Г. А. Калабин, И. В. Калечиц [и др.]. – Москва. – Химия, 1988. – 366 с.
48. Борисов Л. Н. Справочник коксохимика. Том 1 / Л. Н. Борисов, Ю. Г. Шаповалов. – Харьков, 2010. – 536 с.
49. Reid R.C. The properties of gases and liquids / R.C. Reid, J.M. Prausnitz, T.K. Sherwood. – New York. – 1977.
50. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов / В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахметов [и др.]. – Ленинград, 1986 – Энергоатомиздат. – 312 с.

51. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – М.: Изд-во стандартов, 2003
52. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997 год
53. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартиформ, 2014
54. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. М.: Изд-во стандартов, 2016
55. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Росстандарт, 2016 год