

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

Инженерная школа энергетики
Отделение/НОЦ им. И.Н. Бутакова
Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника
Профиль Теоретическая и промышленная теплоэнергетика

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Математическое моделирование термической подготовки и зажигания частицы водоугольного топлива в условиях радиационно-конвективного и электроискрового нагрева

УДК 662.66-032.2:536.331

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	Арышева Наталья Викторовна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Сыродой Семен Владимирович	К.Т.Н		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Наталия Геннадьевна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Василевский Михаил Викторович	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель Отделения/НОЦ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антонова Александра Михайловна	К.Т.Н.		

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы бакалавриата по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
P1	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе <i>на иностранном языке</i> , разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты <i>комплексной</i> инженерной деятельности.
P2	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач.
P3	Демонстрировать <i>личную</i> ответственность, приверженность и следовать профессиональной этике и нормам ведения <i>комплексной</i> инженерной деятельности с соблюдением правовых, социальных, экологических и культурных аспектов.
P4	Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.
P5	К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P6	Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни</i> , непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии, организации обучения и тренинга производственного персонала.
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P7	Применять <i>базовые</i> математические, естественнонаучные, социально-экономические знания в профессиональной деятельности <i>в широком</i> (в том числе междисциплинарном) контексте в <i>комплексной</i> инженерной деятельности в производстве тепловой и электрической энергии.
P8	Анализировать научно-техническую информацию, ставить, решать и публиковать результаты решения задач <i>комплексного</i> инженерного анализа с использованием <i>базовых и специальных</i> знаний, нормативной документации, современных аналитических методов, методов математического анализа и моделирования теоретического и экспериментального исследования.
P9	Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок объектов производства тепловой и электрической энергии, выполнять <i>комплексные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, <i>современных</i> методов проектирования для достижения <i>оптимальных</i> результатов, соответствующих техническому заданию <i>с учетом</i> нормативных документов, экономических, экологических, социальных и других ограничений.
P10	Проводить <i>комплексные</i> научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных публикаций с применением <i>базовых и специальных</i> знаний и <i>современных</i> методов.
P11	Использовать информационные технологии, использовать компьютер как средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать

	опасности и угрозы в развитии современного информационного общества, соблюдать основные требования информационной безопасности.
P12	Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами, использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений.
<i>Специальные профессиональные</i>	
P13	Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.
P14	Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины.
P15	Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.
P16	Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.

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

Инженерная школа энергетики
Отделение/НОЦ им. И.Н. Бутакова
Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника
Профиль Теоретическая и промышленная теплоэнергетика

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель профиля

(Подпись) (Дата) Бульба Е.Е.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	Арышева Наталья Викторовна		

Тема работы:

Математическое моделирование термической подготовки и зажигания частицы водоугольного топлива в условиях радиационно-конвективного электроискрового нагрева

Утверждена приказом ректора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

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 – частицы водоугольного топлива.

Предмет исследования – интегральные характеристики процессов зажигания частиц.

<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>	<ul style="list-style-type: none"> • Анализ литературы по направлению исследования; • Разработка математической модели процессов тепло- и массопереноса при зажигании частиц водоугольного топлива (ВУТ); • Анализ влияния различных факторов (величина силы тока, тепловое излучение внешней среды, вид угля) на характеристики и условия воспламенения.
--	--

Перечень графического материала	
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кузьмина Наталия Геннадьевна, ст. преп.
Социальная ответственность	Василевский Михаил Викторович, доцент

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Сыродой Семен Владимирович	К.Т.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	Арышева Наталья Викторовна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 70 с., 15 рис., 3 табл., 52 источника.

Ключевые слова: тепломассоперенос, математическое моделирование, водоугольное топливо, термическая подготовка, электроискровой нагрев, время задержки зажигания, характеристики зажигания.

Объектом исследования являются частицы водоугольного топлива.

Цель работы – разработка математической модели процессов термической подготовки и воспламенения частиц водоугольного топлива применительно к камерам сгорания ДВС, при учете совместного протекания основных стадий процесса воспламенения: радиационно-конвективного и электроискрового нагрева, испарение влаги, термическое разложение органической компоненты топлива, выход и зажигание летучих.

Проведен анализ влияния изменения теплофизических свойств углей от степени его метаморфизма; силы тока; температуры внешней среды.

Степень внедрения: результаты внедрены в учебный процесс.

Область применения: результаты теоретических исследований в перспективе могут стать базой для разработки государственных и отраслевых стандартов, а также нормативных методик, используемых при проектировании новых двигателей на водоугольном топливе.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Принятые сокращения:

ВУТ – водоугольное топливо;

КС – камера сгорания;

ДВС – двигатель внутреннего сгорания\$

ЭЭ – электрическая энергия.

Принятые обозначения:

T – температура, К;

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

c – теплоемкость, Дж/(кг·К);

ρ – плотность, кг/м³;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

D – коэффициент диффузии, м²/с;

V – объем частицы, м³;

r – радиус частицы, м;

d – диаметр частицы, м;

φ – азимутальный угол, рад;

τ – время, с;

Y – концентрация, 1/м³;

I – сила тока, А;

Q – тепловой эффект, Дж/кг;

γ – объемная доля соответствующего компонента топлива;

η – доля термически разложившегося вещества;

E – энергия активации, Дж/моль;

k – предэкспонент, гетерогенной (m/s) или гомогенной (1/s) реакции;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К;

L – длина, м;

h_r – шаг разностной сетки по пространству, м;

h_τ – шаг по времени, с;

N – количество узлов разностной сетки;

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

$\theta(r, \varphi)$ – функция Хэвисайда.

Безразмерные комплексы:

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

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

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\lambda_0} \text{ – безразмерный коэффициент теплопроводности;}$$

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

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

$$Fo_0 = \frac{a \cdot \tau_0}{r_0^2} \text{ – критерий Фурье;}$$

$$Fo_{dif} = \frac{D \cdot \tau_0}{r_0^2} \text{ – диффузионный критерий Фурье;}$$

$$Ki = \frac{Q_{C+O_2} \cdot W_{C+O_2} \cdot r_0}{T_e \cdot \lambda_0} \text{ – критерий Кирпичева;}$$

$$Sk = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_e^3 \cdot r_0}{\lambda_0} \text{ – критерий Старка;}$$

$$Pom_{eva} = \frac{Q_{eva} \cdot W_{eva} \cdot r_0^2}{h_0 \cdot T_0 \cdot \lambda_0} \text{ – критерий Померанцева для уравнения энергии}$$

частицы, учитывающий испарение;

$$Pom_{id} = \frac{Q_{id} \cdot W_{id} \cdot r_0^2}{T_e \cdot \lambda_0} \text{ – критерий Померанцева для уравнения энергии}$$

частицы, учитывающий тепло при термическом разложении;

$$Pom_{ig} = \frac{Q_{ig} \cdot W_{ig} \cdot r_0^2}{T_e \cdot \lambda_g} \text{ – критерий Померанцева для уравнения энергии}$$

частицы, учитывающий процесс воспламенения;

$$Pom_{eh} = \frac{\left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right) \cdot I \cdot r_0^2}{T_0 \cdot \lambda_0 \cdot V} - \text{критерий Померанцева для уравнения энергии}$$

частицы, обуславливающий Джоулево тепло.

Подстрочные индексы:

1 – исходная частица ВУТ;

2 – газовая область;

3 – электрод;

4 – вода;

5 – уголь;

6 – водяные пары;

v – воздух;

g – газ;

e – внешняя среда;

eva – испарение;

out – внешний;

td – термическое разложение;

ig – зажигание;

sur – поверхность;

ign – зажигание.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	12
Экономическое обоснование использования ВУТ в качестве топлива	12
Проблема внедрения ВУТ в качестве топлива для ДВС	14
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	15
1.1 Краткий обзор экспериментальных исследований процесса воспламенения частиц ВУТ	15
1.2 Краткий обзор теоретических исследований процесса воспламенения частиц ВУТ	17
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	19
2.1 Физическая постановка	19
2.2 Математическая постановка задачи	20
2.3 Тестовые задачи	27
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦЫ	33
3.1 Влияние силы тока на характеристики и условия зажигания водоугольной частицы	33
3.2 Влияние температуры внешней среды на характеристики и условия зажигания водоугольной частицы	37
3.3 Влияние вида угля на характеристики и условия зажигания водоугольной частицы	40
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	45
4.1 Планирование работ и оценка времени их выполнения	45
4.2 Расчет сметы затрат на научное исследование (НИ)	46
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	52

5.1 Производственная безопасность	52
5.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	53
5.3 Охрана окружающей среды	56
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	58
5.5 Пожарная безопасность	60
5.6 Заключение по разделу «Социальная ответственность»	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	63
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	65

ВВЕДЕНИЕ

Экономическое обоснование использования ВУТ в качестве топлива

Анализ сложившихся в последние годы тенденций [1] в развитии мирового энергетического хозяйства указывает на существенную неопределённость в ценообразовании на основные энергоресурсы, которая не подкреплена какими-либо экономическими оценками специалистов [2,3]. Причиной сложившейся ситуации является неравномерное распределение нефтяных ресурсов в мире [4].

Концентрация энергоресурсов на определенной территории зачастую приводит к росту локальной геополитической напряженности, возникающей из-за борьбы за природные ресурсы, и даже к появлению военных конфликтов [5].

Основным же продуктом переработки нефти является бензин и дистилляты [6]. Автомобили являются их основными потребителями. Попытки использования в качестве движителя последних электромеханических преобразователей энергии не нашли пока широкого применения [7]. Это связано с ограниченным ресурсом электрической батареи [8]. По оценкам специалистов [9] еще, по меньшей мере, весь 21 век автомобили в качестве основного движителя будут использовать ДВС. Такая ситуация создает объективные предпосылки для замены традиционных видов энергоносителей (в первую очередь нефти) новыми (альтернативными) видами топлив. Одним из перспективных решений является угольное топливо [10]. Это обусловлено его крупными запасами и истощением месторождений нефти и газа. Также использование угля может стать одним из определяющих факторов снижения напряженности в мире, выравнивания ценовой «турбулентности» на мировых энергетических рынках и решением экологических проблем энергоснабжения, которые стали особенно актуальными в связи с нефтяным загрязнением природы [11].

Применение угля в качестве основного топлива для двигателей внутреннего сгорания пока проблематично вследствие высокой вероятности

формирования твердых золовых отложений в камерах сгорания [12] и низкой (по сравнению с бензином) теплотворной способностью топлива.

Первые попытки применения угля в качестве топлива для ДВС принимались еще Рудольфом Дизелем в конце XIX века, но они не увенчались успехом вследствие слабой способности сухого угля к самовоспламенению в камере сгорания [13]. Также проводились различные исследования, большинство которых из них базировались на технологии газификации твердого топлива, но такое техническое решение неэффективно, учитывая стесненную компоновку транспортных средств (автомобили, локомотивы, речные и морские суда) [14,15].

По этой причине наиболее приемлемым является использование в качестве топлива ДВС новых эколого- и энерго-перспективных топливных композиций на основе водоугольной суспензии (или водоугольного топлива) [16]. Последние позволяют с минимальными конструктивными изменениями провести модернизацию поршневых или роторных двигателей под использование ВУТ [17].

Применение ВУТ по сравнению с другими видами топлив имеет ряд преимуществ. Экономическая актуальность применения ВУТ определяется тем, что ДВС имеют, в основном, транспортное назначение, а основным производителем токсичных выбросов, загрязняющих атмосферу, является транспорт. Применение такого топлива помогает решить две проблемы — снизить выбросы токсичных продуктов сгорания (оксидов азота, серы, а также асфальтенов и бенз(а)пиренов) и уменьшить расход нефтепродуктов [18].

При сравнении нефтяных топлив, угля и ВУТ энергетическая эффективность ВУТ для низкооборотных дизелей и газовых турбин считается экономически перспективной. Результаты исследований и промышленных испытаний позволяют сделать вывод, что стоимость энергии, которую получают при использовании ВУТ стоит наряду со стоимостью энергии, получаемой с использованием дешевых нефтяных топлив. При этом

учитываются все затраты, в том числе на модернизацию и отработку режимов работы двигателей [19].

Проблема внедрения ВУТ в качестве топлива для ДВС

Несмотря на масштабные исследования до настоящего времени нет примеров использования ВУТ в реальной практике в качестве основного топлива для двигателей внутреннего сгорания. Проблемами на пути к расширенному применению водоугольных топлив являются: высокая зольность исходного сырья, низкие показатели стабильности основных технологических характеристик, низкая эффективность известных реагентов – пластификаторов и стабилизаторов [20].

Для практической реализации ВУТ для ДВС необходима разработка экономичных процессов глубокой деминерализации угля и его сверхтонкого измельчения, также должны быть обеспечены условия полного сжигания угольных суспензий, при которых износ двигателей будет минимален [19]. Также стоит отметить, что в настоящее время любая реконструкция, или ввод новых мощностей должны удовлетворять существующим постоянно ужесточающимся нормам по вредным выбросам. Поэтому необходимо найти технологические средства нейтрализации или улавливания выбросов, образующихся при сжигании угольного топлива [21].

Работы последних лет [22,23] привели к достижениям как в технологии приготовления топливных суспензий с требуемыми для двигателей свойствами, так и в модернизации двигателей для сжигания в них угольного топлива. Но, несмотря на это, в отечественной промышленности нет удачных примеров использования ВУТ применительно к камерам сгорания ДВС. Последнее объясняется слабой разработанностью общей теории термической подготовки и инициирования горения таких существенно неоднородных и гетерогенных топлив. Следовательно, осуществление научных исследований и технических проработок по проблеме водоугольного топлива актуально и своевременно в условиях поиска альтернативы нефтяным топливам [19].

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Проблема использования твердых топлив ДВС сохраняет свою актуальность и привлекает к себе интерес специалистов вот уже более ста лет. Основное количество исследований, проводимых в течение этого времени, носило экспериментальный характер, и только в последние десятилетия были предприняты попытки подвести под эти исследования теоретическую базу [17].

1.1 Краткий обзор экспериментальных исследований процесса воспламенения частиц ВУТ

Учеными из Sandia National Laboratories (г. Ливермор, Калифорния) проведены исследования процессов зажигания и горения частиц ВУТ в КС двигателя [24-26]. Экспериментальные исследования были проведены в цилиндрической бомбе с оптическим доступом. По результатам исследований были получены времена задержки воспламенения в условиях, максимально близких к реальному ДВС. Установлено существенное влияние комплекса процессов тепло и массопереноса на характеристики и условия зажигания капель ВУТ.

Масштабные исследования проведены американским исследователем Франком Роббенем на модернизированном дизельном двигателе с помощью прибора для исследования воспламенения и сгорания ВУТ [24]. Для изучения характеристик зажигания в стенках цилиндров двигателя были вмонтированы стеклянные вставки. С помощью высокоскоростной съемки были изучены процессы, происходящие внутри камеры сгорания. Параметры сжигания исследовались как функция характеристик двигателя от свойств топлива. Было установлено, что капли ВУТ могут стабильно воспламеняться и гореть во внутрикамерном пространстве ДВС.

В 1982 году ученые Likos W.E., Ryan T. W. и Moses C.A. из Юго-западного исследовательского института США изучали возможность использования угольных суспензий различных составов в дизельном

двигателе. Для испытаний использовался одноцилиндровый двигатель с впрыском топлива в КС. Каменный уголь, кокс и сажа были рассмотрены в качестве твердого топлива и показали хорошие результаты [27]. В дальнейших работах было изучено влияние состава топлива на характеристики воспламенения и горения. Данные исследования внесли значительные изменения в конструкцию ДВС и топливную систему. При модернизации двигателя была улучшена эффективность использования топлива за счет уменьшения интенсивности подачи угля и увеличения степени сжатия.

Управление охраны окружающей среды Министерства энергетики США запустили программу в конце 70-х годов 20 века по изучению угольных топлив при использовании их в двигателях. Полученные результаты позволили направить ресурсы на создание опытных двигателей, способных работать на различных видах угольного топлива, которые впоследствии могли быть пригодны для нужд промышленности и транспорта [28]. По итогу лабораторных испытаний был составлен ряд требований к конструктивным характеристикам и подготовке топлива, соблюдение которых необходимо для эффективного сжигания топлив в цилиндре двигателя. Также были получены сведения о влиянии конструктивных особенностей системы впрыска и состава топлива на износ двигателя, об устойчивости различных конструкционных материалов.

Компания Sulzer, производящая низкооборотные судовые дизели начиная с 1978 года [29, 30] проводила эксперимента на одноцилиндровом двигателе. Специалисты пришли к выводу, что водоугольные суспензии предпочтительней использовать в двигателях без клапанной системы газораспределения. Также было установлено, что использование ВУТ в дизелях имеет такие же проблемы, как и в случае сжигания тяжёлых углеводородов (например, нефть или мазут). При этом топливный состав значительно влияет на токсичность отработавших газов и удельный расход топлива. В итоге было установлено, что оптимальным является соотношение компонентов топлива:

50% угольной пыли, 30% воды и 20% дизельного топлива. На этом испытания не закончились, и в 1982 был запущен следующий этап исследований, в результате которых было установлено, что малооборотные дизельные двигатели имеют необходимые характеристики, которые могут обеспечить полное и эффективное сжигание как топливоугольных так и водоугольных суспензий.

1.2 Краткий обзор теоретических исследований процесса воспламенения частиц ВУТ

Водоугольное топливо представляет собой существенно неоднородную гетерогенную среду, состоящую из твердых (уголь), жидких (вода, жидкое горючее) и газообразных (водяной пар, продукты пиролиза) компонентов. Очевидно, что теплоперенос в таких структурах очень сложен для математического описания [31].

До настоящего времени разработаны только очень упрощенные математические модели процессов воспламенения и горения частиц водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания ДВС [32-36]. Большинство из них базируется на простейших термодинамических подходах, в той или иной степени представляющих собой следствие закона Клайперона-Менделеева. При этом зажигание одиночной частицы в камерах сгорания двигателя раньше практически не рассматривалось. Хотя характеристики зажигания и горения одной топливной частицы являются определяющими и характеризуют работу всего внутрикамерного пространства.

В [36] приведены результаты численного моделирования процесса зажигания одиночной капли ВУТ. Однако приведенная в [36] модель базируется на простейших уравнениях теплопроводности. При этом не учитывается распределение температуры по радиусу частицы. Такая постановка позволяет существенно упростить процедуру моделирования и

получить в первом приближении характеристики процесса (в первую очередь время задержки воспламенения) в виде простых аналитических зависимостей.

Обобщая все вышеизложенное можно сказать, что несмотря на проведённые ранее обширные и широкомасштабные экспериментальные исследования процессов воспламенения и горения водоугольного топлива в условиях камер сгорания ДВС до сих пор не разработано физических основ процесса термической подготовки, зажигания и окисления частиц ВУТ. Это существенно тормозит работы по созданию ДВС, эффективно работающих на водоугольном топливе. Последние могут быть использованы для тихоходного транспорта (например, речные и морские суда). Применение такого дешёвого (по сравнению с нефтью) топлива как уголь в двигателях внутреннего сгорания может существенно повысить конкурентоспособность транспортных средств, работающих на ВУТ.

По этой причине основной целью исследования является построение основных элементов теории воспламенения частиц водоугольного топлива в условиях сложного радиационно-конвективного и электроискрового нагрева применительно к камерам сгорания поршневых двигателей.

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

2.1 Физическая постановка

Принята физическая модель процессов тепло – и массопереноса (радиационно-конвективный и электроискровой нагрев) в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и физико-химических (термическое разложение, выход летучих, взаимодействие водяных паров и углерода, взаимодействия парогазовой смеси с окислителем) превращений, протекающих совместно в индукционный период времени. В качестве основного объекта исследований рассматривается частица водоугольного топлива (рисунок 1).

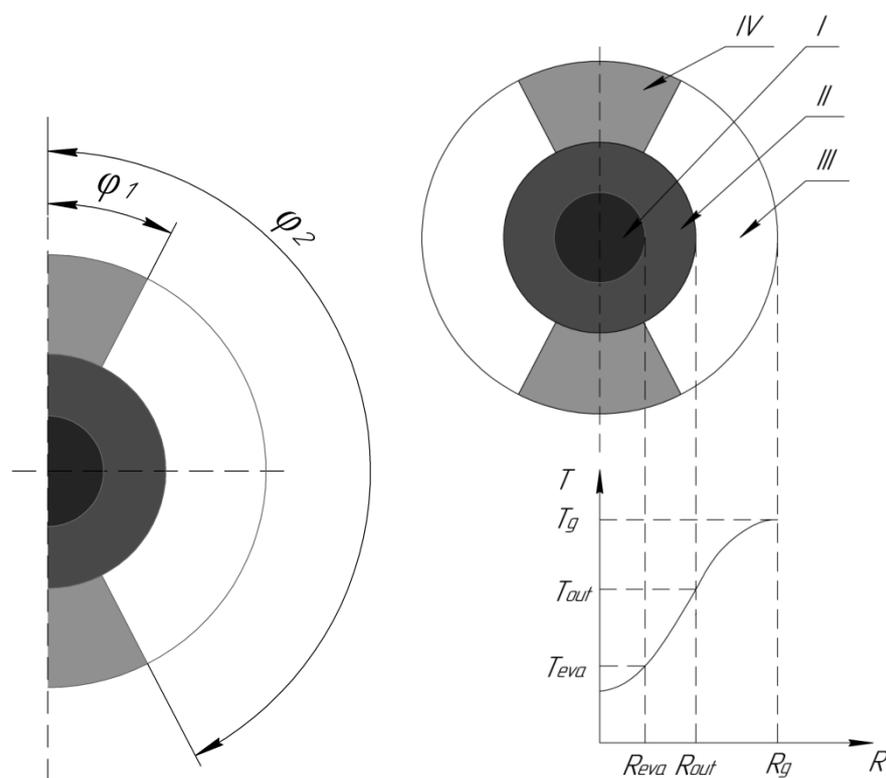


Рисунок 1 – Область решения задачи: I – область влагонасыщенного топлива (исходное состояние); II – область «обезвоженного» угля; III – газовая область; IV – электрод.

Частица водоугольного топлива попадает в межэлектродное пространство внутри камеры сгорания ДВС. В результате интенсивного радиационно-конвективного (обусловленного высокоэнергетическим состоянием стенок камеры сгорания ДВС) и электроискрового нагрева

(обусловленного разностью потенциалов на концах электрода) частица ВУТ начинает нагреваться. В результате инициируется процесс испарения воды. Фронт испарения движется от поверхностных слоев частицы в глубинные.

Также стоит отметить, что в результате электрического нагрева внутри частицы возможно повышение температуры. Последнее может привести к формированию фронта испарения, который движется из глубины частицы на поверхность. В результате формируется неоднородная гетерогенная структура, состоящая из жидких и твердых компонентов топлива с существенно отличающимися теплофизическими характеристиками. Дальнейший нагрев приводит к процессу термического разложения. Продукты пиролиза совместно с парами воды фильтруются на поверхность частицы. В пограничном слое капли ВУТ последние формируют парогазовую смесь, которая при достижении критических значений температуры и концентраций может воспламеняться.

Стоит отметить, что в результате такого сложного комбинированного радиационно-конвективного, кондуктивного и электроискрового нагрева в частице формируется фронт испарения, форма которого существенно не линейна и не поддается полиномиальной аппроксимации. При этом в окрестностях образуется интенсивный сингулярно сгущенный сток теплоты. Такие задачи называются многофронтными или многофазными задачами Стефана. Последние являются одними из самых сложных задач в математической физике. Для разрешения подобной задачи был разработан специальный алгоритм основанный на квази неявном выделении фронта испарения.

2.2 Математическая постановка задачи

Математическая постановка задачи воспламенения частицы ВУТ соответствует физической модели, сформулированной выше, и включает систему нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных для системы «частица ВУТ – высокотемпературная среда».

Уравнение энергии для частицы ВУТ:

$$c_1(T)\rho_1(T)\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[r^2 \cdot \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r}\right] + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left[\lambda_1 \cdot \sin \varphi \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \varphi}\right] - \frac{Q_{eva} \cdot W_{eva}}{h_d} \cdot \delta(r, \varphi) + Q_{td}W_{td} \cdot \theta(r, \varphi) + \frac{div(U) \cdot I}{V},$$

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

где $\delta(r, \varphi)$ – Функция Дирака; $\theta(r, \varphi)$ – Функция Хевисайда; V – объем частицы. Теплофизические характеристики (λ , C и ρ) определяются из положения фронта испарения.

Разложение топлива с выделением летучих начинается при достижении на поверхности частицы условия $T_{sur} \geq T_{td}$ (T_{sur} – температура поверхности частицы, T_{td} – температура начала термического разложения). Данный процесс описывается уравнением химической кинетики для органической части топлива:

$$\frac{\partial \eta(r, \varphi, t)}{\partial t} = (1 - \eta(r, \varphi, t)) \cdot k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T(r, \varphi, t)}\right),$$

$$\tau > 0, r_{eva} < r < r_g, 0 < \varphi < \pi, T \geq T_{eva}.$$

Напряженность электрического поля вычислялась из решения уравнения для потенциала электрического поля:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} - \cot \varphi \frac{\partial U}{\partial \varphi} + R^2 \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} = 0,$$

$$\tau > 0, r_{out} < r < r_g, 0 < \varphi < \varphi_1, \varphi_2 < \varphi < \pi, T \geq T_{eva}.$$

При том напряженность электрического поля в этом случае выражается как:

$$\vec{E} = -\nabla U, \quad E_r = -\frac{\partial U}{\partial r}, \quad E_\varphi = -\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi}.$$

Распределение температуры в газовой области описывается уравнением энергии. Последнее учитывает экзотермические эффекты реакций окисления основных горючих компонентов воздухом:

$$c_2(T)\rho_2(T)\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[r^2 \cdot \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r}\right] + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left[\lambda_2 \cdot \sin \varphi \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \varphi}\right] + Q_{ig} \cdot W_{ig}, \quad (5)$$

$\tau > 0, r_{out} < r < r_g, \varphi_1 < \varphi < \varphi_2, T \leq T_{eva}.$

Распределение температуры в электродах описывается уравнением:

$$c_3(T)\rho_3(T)\frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[r^2 \cdot \lambda_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial r}\right] + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left[\lambda_3 \cdot \sin \varphi \cdot \frac{\partial T_3}{\partial \varphi}\right], \quad (6)$$

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

Система уравнений (1–5) решалась при следующих краевых условиях:

$$\tau = 0: T(r, \varphi) = T_0, \quad \eta(r, \varphi) = \eta_0, \quad \text{при } 0 < r < r_g, \quad 0 < \varphi < \pi, \quad (7)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad (8)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_g} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \quad (9)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=r_{out}} = 0, \quad \text{при } \varphi_1 < \varphi < \varphi_2, \quad (10)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=r_{out}} = U, \quad \text{при } 0 < \varphi < \varphi_1, \varphi_1 < \varphi < \varphi_2, \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \quad \text{при } r_{out} < r < r_g. \quad (12)$$

На границах раздела с существенно отличающимися теплофизическими характеристиками выполняется граничное условие 4-го рода:

- Для системы «частица ВУТ – газовая среда». При этом учитывается эндотермический эффект реакции углерода с кислородом воздуха:

$$\begin{cases} T_1(r_{out}, \varphi, t) = T_2(r_{out}, \varphi, t) \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} + Q_{C+O_2} W_{C+O_2} + \varepsilon \sigma (T_g^4 - T|_{r=r_{out}}^4) \end{cases} \text{при } r = r_{out}, \quad \varphi_1 < \varphi < \varphi_2, \quad (13)$$

- Для системы «частица ВУТ – электрод»:

$$\begin{cases} T_1(r_{out}, \varphi, t) = T_3(r_{out}, \varphi, t) \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \end{cases} \text{при } r = r_{out}, \quad 0 < \varphi < \varphi_1, \quad \varphi_2 < \varphi < \pi, \quad (14)$$

- Для системы «электрод – газовая среда»:

$$\begin{cases} T_2(r_{out}, \varphi, t) = T_3(r_{out}, \varphi, t) \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \end{cases} \text{ при } \varphi = \varphi_1, \varphi = \varphi_2, r_{out} < r < r_g. \quad (15)$$

Скорость реакции $C + O_2 = CO_2 + 18,67 \text{ МДж} / \text{кг}$ вычислялась из математического выражения закона Аррениуса:

$$W_{C+O_2} = k_{C+O_2} \cdot c_{O_2} \cdot \rho_s \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T(r, \varphi, t)}\right). \quad (16)$$

Скорость пиролиза рассчитывалась из следующего соотношения:

$$W_{id} = (1 - \eta(r, \varphi, t)) \cdot \rho_1 \cdot k \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T(r, \varphi, t)}\right). \quad (17)$$

Зажигание водоугольного топлива – гетерогенный процесс, скорость которого определяется кинетикой воспламенения смеси продуктов термического разложения и реакции взаимодействия водяного пара с углеродом.

Период времени от начала теплового воздействия на частицу до начала интенсивного химического взаимодействия парогазовой смеси с окислителем является временем задержки воспламенения. При этом количество теплоты, выделяемой в результате окисления горючего, превышает поступающую из внешней среды. В непосредственной близости от поверхности частицы учитывалось протекание реакции:



Скорость этой реакции вычислялась из математического выражения закона Аррениуса:

$$W_{ig} = (1 - c_{H_2O} - c_{CH_4}) \cdot c_{CH_4} \cdot \rho_i \cdot k \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{R \cdot T_g}\right). \quad (18)$$

Концентрация горючих компонентов (CH_4) в пристенной области при решении уравнения диффузии для соответствующего компонента реакции:

$$\rho_g \frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{D_{CH_4} \cdot \rho_g}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \frac{\partial Y_{CH_4}}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\sin \varphi \cdot \frac{\partial Y_{CH_4}}{\partial \varphi} \right] - W_{ig}, \quad (19)$$

$$r_{out} < r < r_g, \varphi_1 < \varphi < \varphi_2.$$

Концентрации водяных паров определялись аналогично:

$$\rho_g \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial t} = \frac{D_{H_2O} \cdot \rho_g}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\sin \varphi \cdot \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial \varphi} \right], \quad (20)$$

$$r_{out} < r < r_g, \quad \varphi_1 < \varphi < \varphi_2.$$

Уравнения (15-16) решались при следующих граничных условиях:

$$\tau = 0: T(r, \varphi) = T_g, \quad c_i(r, \varphi) = 0, \quad \text{при } r_{out} < r < r_g, \quad \varphi_1 < \varphi < \varphi_2, \quad (21)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial r} \right|_{r=r_{out}} = \frac{W_{eva}}{\rho_g \cdot D_{H_2O}}, \quad \left. \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial \varphi} \right|_{r=r_{out}} = \frac{W_{eva}}{\rho_g \cdot D_{H_2O}}, \quad (22)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial Y_{CH_4}}{\partial r} \right|_{r=r_{out}} = \frac{W_{td}}{\rho_g \cdot D_{CH_4}}, \quad \left. \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial \varphi} \right|_{r=r_{out}} = \frac{W_{eva}}{\rho_g \cdot D_{H_2O}}. \quad (23)$$

Теплопроводность, теплоемкость и плотность влажной и «обезвоженной» частей древесины рассчитывались с учетом объемных долей КОМПОНЕНТ:

$$\lambda_1 = \varphi_4 \cdot \lambda_4 + \varphi_5 \cdot \lambda_5; \quad \lambda_2 = \varphi_5 \cdot \lambda_5 + \varphi_6 \cdot \lambda_6, \quad (24)$$

$$c_1 = \varphi_4 \cdot c_4 + \varphi_5 \cdot c_5; \quad c_2 = \varphi_5 \cdot c_5 + \varphi_6 \cdot c_6, \quad (25)$$

$$\rho_1 = \varphi_4 \cdot \rho_4 + \varphi_5 \cdot \rho_5; \quad \rho_2 = \varphi_5 \cdot \rho_5 + \varphi_6 \cdot \rho_6, \quad (26)$$

где φ – объемная доля соответствующего компонента топлива: 4 – вода, 5 – уголь, 6 – водяные пары.

С целью проведения параметрического анализа и улучшения процедуры расчета характеристик и условия зажигания водоугольной частицы в условиях электроискрового нагрева система (1-5) решалась в безразмерных переменных:

$$R = \frac{r}{r_0}, \quad C = \frac{c}{r_0}, \quad \Lambda = \frac{\lambda}{\lambda_0}, \quad P = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad \theta = \frac{T}{T_e}, \quad (27)$$

$$Fo = \frac{a \cdot \tau_0}{r_0^2}, \quad Fo_{dif} = \frac{D \cdot \tau_0}{r_0^2}, \quad (28)$$

$$Pom_{eva} = \frac{Q_{eva} \cdot W_{eva} \cdot r_0^2}{h_0 \cdot T_0 \cdot \lambda_0}, \quad (29)$$

$$Pom_{td} = \frac{Q_{td} \cdot W_{td} \cdot r_0^2}{T_e \cdot \lambda_0}, \quad (30)$$

$$Pom_{ig} = \frac{Q_{ig} \cdot W_{ig} \cdot r_0^2}{T_e \cdot \lambda_g}, \quad (31)$$

$$Pom_{eh} = \frac{\left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right) \cdot I \cdot r_0^2}{T_0 \cdot \lambda_0}, \quad (32)$$

$$Ki = \frac{Q_{C+O_2} \cdot W_{C+O_2} \cdot r_0}{T_e \cdot \lambda_0}, \quad (33)$$

$$Sk = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_e^3 r_0}{\lambda_0}. \quad (34)$$

Ниже представлена математическая постановка задачи воспламенения частицы ВУТ в соответствующих безразмерных переменных.

Уравнение энергии для частицы водоугольного топлива:

$$\frac{C_1 \cdot P_1}{F_{O_1}} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[\Lambda_1 \cdot R^2 \cdot \frac{\partial \theta}{\partial R} \right] + \frac{1}{R^2 \cdot \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\Lambda_1 \cdot \sin \varphi \cdot \frac{\partial \theta}{\partial R} \right] - Pom_{eva} \cdot \delta(r, \varphi) + Pom_{td} \cdot \theta(r, \varphi) + Pom_{eh}, \quad (35)$$

$$\tau > 0, R_{eva} < R < R_g, 0 < \varphi < \pi, \theta \geq 0.$$

Уравнение энергии для газовой области:

$$\frac{C_2 \cdot P_2}{F_{O_2}} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[\Lambda_2 \cdot R^2 \cdot \frac{\partial \theta}{\partial R} \right] + \frac{1}{R^2 \cdot \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\Lambda_2 \cdot \sin \varphi \cdot \frac{\partial \theta}{\partial R} \right] - Pom_{ig}, \quad (36)$$

$$\tau > 0, R_{out} < R < R_g, \varphi_1 < \varphi < \varphi_2, \theta \geq \theta_{eva}.$$

Уравнение энергии для электродов:

$$\frac{C_3 \cdot P_3}{F_o} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[\Lambda_3 \cdot R^2 \cdot \frac{\partial \theta}{\partial R} \right] + \frac{1}{R^2 \cdot \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\Lambda_3 \cdot \sin \varphi \cdot \frac{\partial \theta}{\partial R} \right], \quad (37)$$

$$\tau > 0, R_{out} < R < R_g, 0 < \varphi < \varphi_1, \varphi_2 < \varphi < \pi, \theta \leq \theta_{eva}.$$

Уравнения для потенциала электрического поля:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} - \cot \varphi \frac{\partial U}{\partial \varphi} + R^2 \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} = 0, \quad (38)$$

$$\tau > 0, R_{out} < R < R_g, 0 < \varphi < \varphi_1, \varphi_2 < \varphi < \pi, \theta \geq \theta_{eva}.$$

Уравнение диффузии для продуктов пиролиза:

$$\frac{1}{Fo_{dif}} \frac{\partial Y_{CH_4}}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \cdot \frac{\partial Y_{CH_4}}{\partial R} \right] + \frac{1}{R^2 \cdot \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\sin \varphi \cdot \frac{\partial Y_{CH_4}}{\partial \varphi} \right], \quad (39)$$

$$\tau > 0, R_{out} < R < R_g, \varphi_1 < \varphi < \varphi_2.$$

Уравнение диффузии для водяных паров:

$$\frac{1}{Fo_{dif}} \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^2 \cdot \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial R} \right] + \frac{1}{R^2 \cdot \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\sin \varphi \cdot \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial \varphi} \right], \quad (40)$$

$$\tau > 0, R_{out} < R < R_g, \varphi_1 < \varphi < \varphi_2.$$

Система уравнений (31-36) решалась при следующих краевых условиях:

$$\tau = 0: \theta(R, \varphi) = \theta_0, \text{ при } 0 < R < R_g, 0 < \varphi < \pi, \quad (41)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad (42)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=R_g} = 0, \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \quad (43)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial U}{\partial R} \right|_{R=R_{out}} = 0, \text{ при } \varphi_1 < \varphi < \varphi_2, \quad (44)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial U}{\partial R} \right|_{R=R_{out}} = U, \text{ при } 0 < \varphi < \varphi_1, \varphi_2 < \varphi < \pi, \quad (45)$$

$$\tau > 0: \left. \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, \text{ при } R_{out} < R < R_g. \quad (46)$$

На границах раздела с существенно отличающимися теплофизическими характеристиками выполняется граничное условие 4-го рода:

- Для системы «частица ВУТ – газовая среда».

$$\begin{cases} \theta_1(R, \varphi, \tau) = \theta_2(R, \varphi, \tau) \\ \Lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial R} = \Lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial R} + Ki_{C+O_2} + Sk \left(1 - \theta \Big|_{R=R_{out}} \right) \end{cases} \text{ при } R = R_{out}, \varphi_1 < \varphi < \varphi_2, \quad (47)$$

- Для системы «частица ВУТ – электрод»:

$$\begin{cases} \theta_1(R, \varphi, \tau) = \theta_3(R, \varphi, \tau) \\ \Lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial R} = \Lambda_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial R} \end{cases} \text{ при } R = R_{out}, 0 < \varphi < \varphi_1, \varphi_2 < \varphi < \pi, \quad (48)$$

- Для системы «электрод – газовая среда»:

$$\begin{cases} \theta_2(R, \varphi, \tau) = \theta_3(R, \varphi, \tau) \\ \Lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial R} = \Lambda_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial R} \end{cases} \quad \text{при } \varphi = \varphi_1, \varphi = \varphi_2, R_{out} < R < R_g. \quad (49)$$

Система (1-20) решена методом конечных разностей [37]. Задача испарения решалась методом сквозного счета с применением квазинеявного выделения фронта испарения [38]. Уравнение потенциала электрического поля решалось методом последовательных приближений [39]. Оценка достоверности полученных результатов проводилась проверкой консервативности разностной схемы [40]. Так же проведено решение группы тестовых задач.

2.3 Тестовые задачи

В целях верификации математической модели было выполнено решение некоторых тестовых задач.

Задача 1. Определить температурное поле в сфере радиуса $R=0,1$ м через 30, 180, 600 секунд процесса нагрева. Материал сферы – кирпич ($c = 750$ Дж/(кг · °С), $\rho = 1500$ кг/м³, $\lambda = 0,7$ Вт/(м · °С)). На границе $r=R$ приложен тепловой поток $q = 5500$ Вт/м². Начальная температура $T_0 = 20$ °С. Геометрия задачи представлена на рисунке 2.

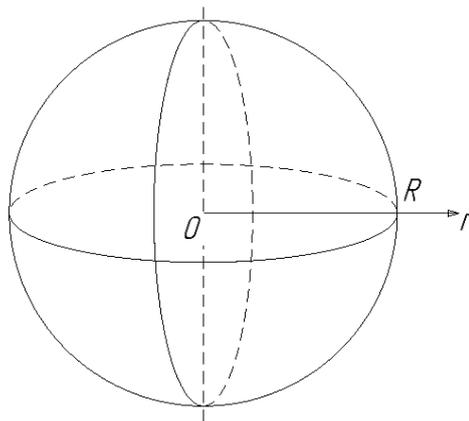


Рисунок 2 – Геометрия задачи

В качестве граничных условий на внешней поверхности использовались граничные условия второго рода (задается значение теплового потока для каждой точки поверхности тела в любой момент времени), тогда математическая постановка будет иметь следующий вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right], \quad 0 < r < R, \quad (50)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = q. \quad (51)$$

Результаты численного моделирования приведены на рисунке 3.

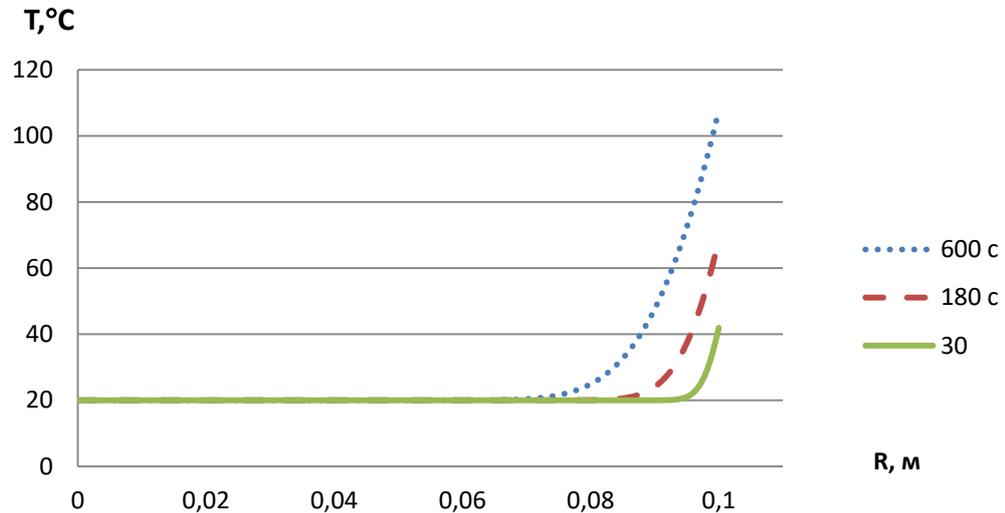


Рисунок 3 – Распределение температуры по радиусу сферы за разные промежутки времени (при заданных граничных условиях II рода)

Если задать граничные условия первого рода вместо граничных условий второго рода (т.е. задать температуру на границе $T=100^\circ\text{C}$) получим:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad T|_{r=R} = T_e. \quad (52)$$

Результаты численного моделирования приведены на рисунке 4.

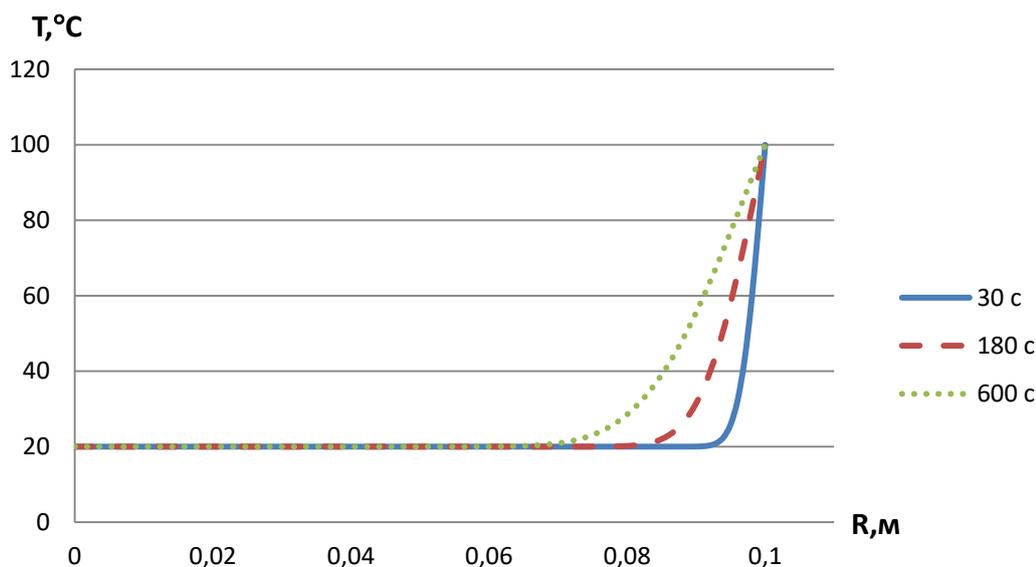


Рисунок 4 – Распределение температуры по радиусу сферы за разные промежутки времени (при заданных условиях I рода)

Задача 2. Определить температурное поле в двухслойной сфере радиуса $R=0,5$ м через 30, 180, 600 секунд процесса нагрева. Внутренний материал 1 – кирпич ($c_1 = 450$ Дж/(кг · К), $\rho_1 = 7850$ кг/м³, $\lambda_1 = 92$ Вт/(м · К)), внешний 2 – бетон ($c_2 = 840$ Дж/(кг · К), $\rho_2 = 500$ кг/м³, $\lambda_2 = 140$ Вт/(м · К)). Граница $r=R$ подвержена воздействию окружающей среды ($T^e = 700$ К, $\alpha = 100 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$). Начальная температура $T_0 = 300$ К. Геометрия задачи представлена на рисунке 5.

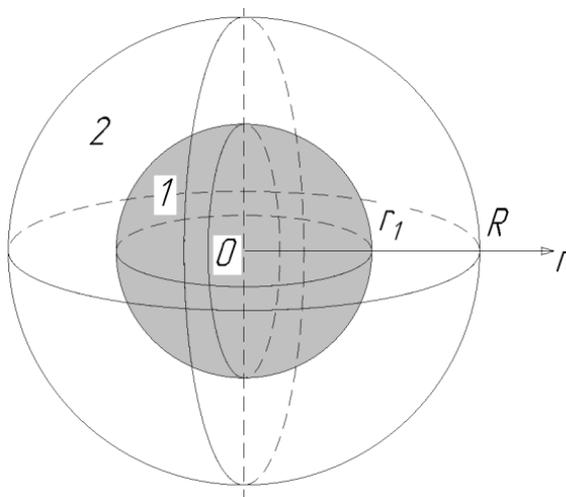


Рисунок 5 – Геометрия задачи

Математическая постановка сформулированной задачи:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right], \quad (53)$$

$$t = 0: T = T_0, \quad 0 \leq r \leq R, \quad (54)$$

$$t > 0: -\lambda \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (55)$$

$$t > 0: -\lambda \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha \cdot (T^e - T). \quad (56)$$

Результаты численного моделирования приведены на рисунке 6.

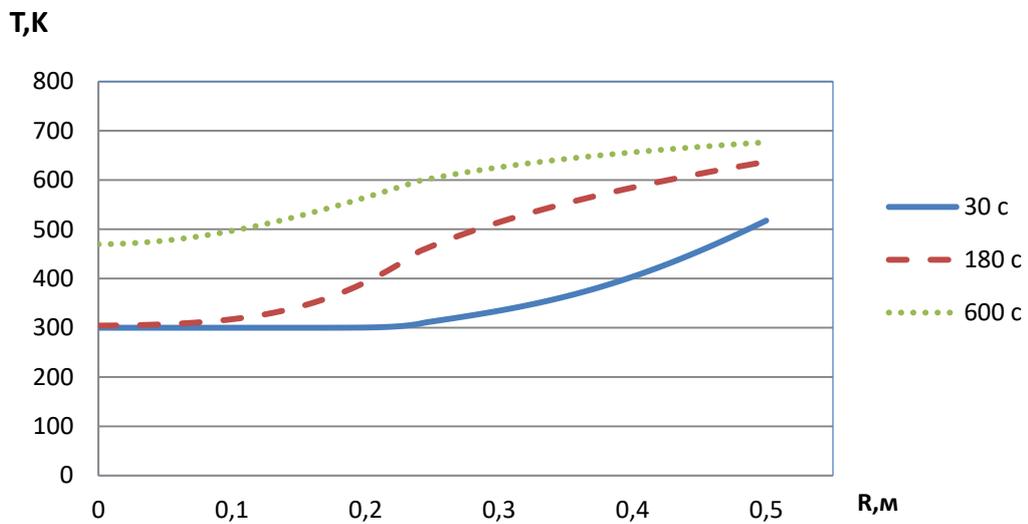


Рисунок 6 – Распределение температуры по радиусу сферы за разные промежутки времени

Задача 3. Определить температурное поле в пластине, подверженной термическому разложению, через 600, 1800, 3600 секунд процесса нагрева. Начальная температура $T_0=298$ К. Толщина пластинки $L=0,2$ м. Материал пластины – полимер со следующими теплофизическими характеристиками: $c = 450$ Дж/(кг · К), $\rho = 7850$ кг/м³, $\lambda = 92$ Вт/(м · К). На границах $x=0$ и $x=L$ пластина контактирует с окружающей средой ($T^e = 243$ К, $\alpha = 40$ Вт/(м² · К)). Тепловой эффект химической реакции $q_{\text{хим}} = 10^3$ Вт/кг, энергия активации химической реакции $E = 8 \cdot 10^4$ Дж/моль, предэкспонент химической реакции $k_0 = 3 \cdot 10^4$. Геометрия задачи рисунок 7.

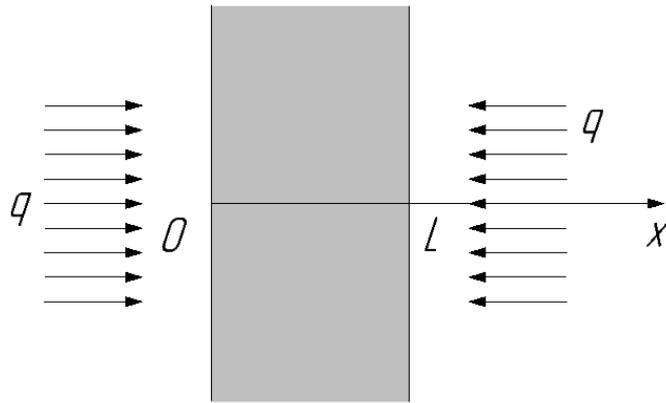


Рисунок 7 – Геометрия задачи

Математическая постановка сформулированной задачи:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - q_{\text{хим}} k_0 \left(-\frac{E}{RT} \right), \quad (57)$$

$$t = 0: T = T_0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (58)$$

$$t > 0: -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha (T^e - T), \quad (59)$$

$$t > 0: \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = \alpha \cdot (T^e - T), \quad (60)$$

Результаты численного моделирования приведены на рисунке 8.

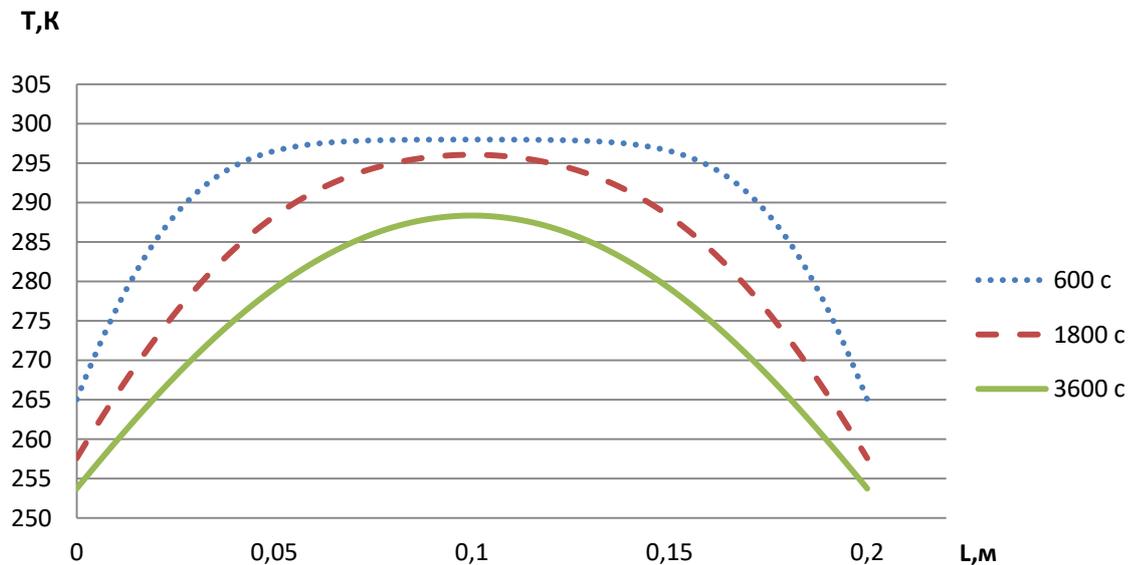


Рисунок 8 – Распределение температуры по толщине пластины в различные моменты времени

После анализа зависимостей, приведенных на рисунках 3-8 и кривых, полученных после решения аналогичных задач, приведенных в [41], то можно сделать вывод, что полученные распределения температур идентичны.

После проведенной верификации математической модели (1)-(49) можно сделать вывод о достаточно высоком прогностическом потенциале разработанной математической модели.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦЫ

Приведены результаты математического моделирования процессов термической подготовки и воспламенения капель ВУТ в условиях радиационно-конвективного и электроискрового нагрева.

3.1 Влияние силы тока на характеристики и условия зажигания водоугольной частицы

Одной из важнейших характеристик, обуславливающих зажигание и горение смеси в камере сгорания ДВС, является сила тока электрической искры. Это объясняется тем, что для стабильной и эффективной работы двигательной системы любого транспортного средства, необходимо обеспечение ее достаточным количеством электрической энергии (ЭЭ). Основным потребителем ЭЭ при запуске являются свечи зажигания и стартер. В свече зажигания искра формируется вследствие явления дугового разряда, когда между двумя электродами происходит электрический пробой. Соответственно, встает вопрос выбора оптимальной энергии искры, которая обеспечила бы стабильное воспламенение частиц ВУТ в условиях работы камер сгорания поршневых двигателей.

На рисунке 9 приведены зависимости времен задержки воспламенения (τ_{ign}) частицы ВУТ от силы тока (I). Анализ кривых показывает, что изменение I с 0,1 мА до 3 мА оказывает существенное влияние на динамику термической подготовки и воспламенения топлива. При $I < 1$ мА процесс зажигания частицы значительно замедляется, особенно это проявляется при температуре внешней среды $T_e < 700$ К. При этом стоит отметить, что варьирование T_e в условиях, когда $I > 1$ мА, не приводит к значительным изменениям времен задержки воспламенения. Это объясняется тем, что в этих температурных условиях амплитудно-частотные характеристики электрического тока оказывают более существенное влияние на динамику термической подготовки ВУТ, чем

высокотемпературная среда. При $T_e=500$ К можно заметить, что $\tau_{ign} \rightarrow \infty$, это обуславливается тем, что в таких температурных условиях количество электрической энергии не достаточно для воспламенения частицы водоугольного топлива.

Также необходимо отметить нелинейный характер кривых (рисунок 9). Это свидетельствует о существенном влиянии комплекса процессов термической подготовки (конвективно-радиационный и электроискровой нагрев, испарение влаги, термическое разложение органической части топлива, термохимическое взаимодействие водяных паров и углерода кокса, воспламенение летучих) и воспламенения (окисление летучих), протекающих совместно в индукционный период времени.

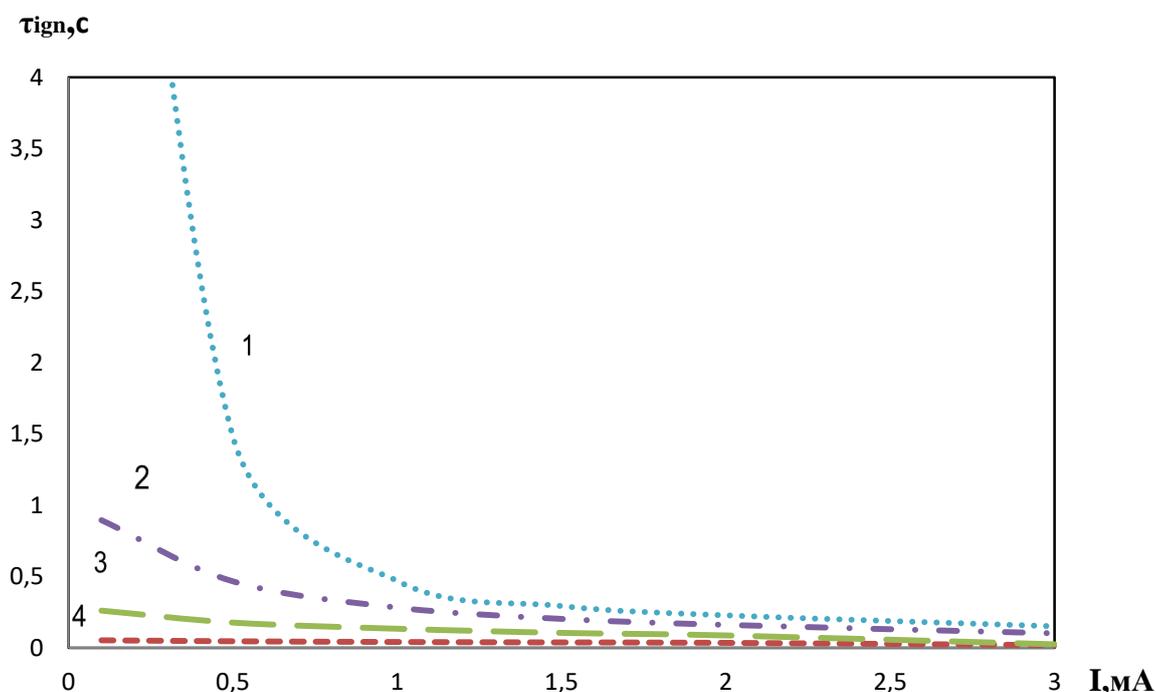


Рисунок 9 – Зависимость времени зажигания от силы тока при различных температурах внешней среды:

1 – $T_e=500$ К; 2 – $T_e=600$ К; 3 – $T_e=700$ К; 4 – $T_e=800$ К.

На рисунке 10 приведены температурные поля при температуре внешней среды $T_e=700$ К в различные моменты времени, в условиях варирования $I=0,5$ мА (рис. 10 – а, б, в), $I=0,1$ мА (рис. 10 – г, д, е). Можно

отметить, что в начальный момент времени (рис. 10 – а, г) в частице ВУТ формируется фронт испарения, при этом его локализация находится в зоне сопряжения водоугольной частицы с электродами. Это обусловлено тем, что электроды, выполненные из металлов различной природы, как правило, имеют более высокие значения коэффициента теплопроводности и теплоемкости, чем водоугольное топливо. Соответственно, интенсивность кондуктивного теплопереноса в этой зоне значительно превышает интенсивность конвективного теплообмена в зоне сопряжения капли ВУТ и газовой среды. Также в области взаимодействия электродов локализуются тепловые источники, обусловленные электрическим нагревом.

При дальнейшем нагревании (рисунок 10 б, г) можно отметить формирование существенно искаженной линии фронта испарения. Форма этого фронта обусловлена распределением тепловых потоков в частице ВУТ. Дальнейший нагрев приводит к термическому разложению и выходу летучих, при достижении критических значений их концентраций в газовой области происходит воспламенение.

На рисунке 10 (д, е) можно выделить зону воспламенения, которая находится на $0,5d$ от поверхности частицы. Скорее всего, водяные пары формируют вблизи частицы некую «барьерную» область, препятствующую диффузии окислителя в зону высоких концентрации газообразных продуктов пиролиза угля.

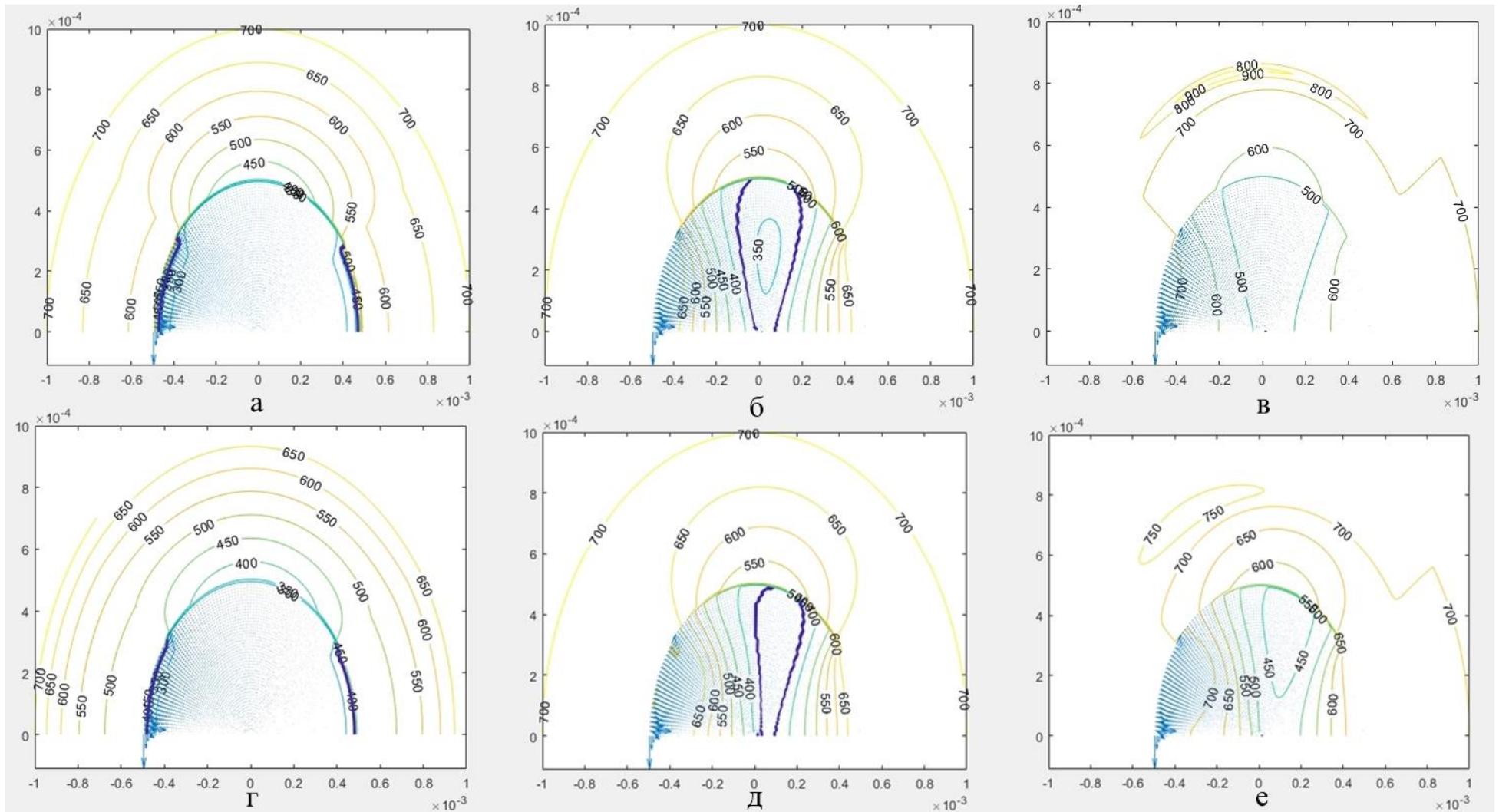


Рисунок 10 – Температурное поле при $T_e=700\text{K}$ в различные моменты времени: $I=0,5\text{ mA}$ – а, б, в; $I=0,1\text{ mA}$ – г, д, е.
а – $\tau=0,002\text{ c}$; б – $\tau=0,1\text{ c}$; в – $\tau=0,177\text{ c}$; г – $\tau=0,002\text{ c}$; д – $\tau=0,13\text{ c}$; е – $\tau=0,261\text{ c}$.

3.2 Влияние температуры внешней среды на характеристики и условия зажигания водоугольной частицы

Температура окружающего воздуха является одним из доминирующих факторов, оказывающих значительное влияние на условия работы двигателя и эффективности транспортного средства в целом.

При высокой температуре атмосферного воздуха происходит снижение мощности ДВС за счет уменьшения массовой подачи топлива [42]. Сравнительно менее интенсивное снижение мощности происходит при высоких значениях T_v (температура воздуха) в камере сгорания в конце сжатия, в связи с чем, протекание предпламенных реакций улучшается и уменьшается период задержки воспламенения.

При пуске холодного двигателя, за счет усиленного теплообмена между стенками цилиндра и воздушным зарядом, происходит замедленное повышение температуры сжимаемого воздуха, и как следствие, условия самовоспламенения топлива ухудшаются. Это приводит к тому, что увеличивается время на прогрев, испарение влаги и воспламенение топлива, следовательно, происходит нарушение процесса [42]. Поэтому температура внешней среды является важным фактором, влияние которого необходимо исследовать для оценки характеристик зажигания.

На рисунке 11 приведены теоретические зависимости времен задержки воспламенения частицы от температуры внешней среды. Анализ результатов показывает, что T_e оказывает существенное влияние на динамику термической подготовки и воспламенения топлива. При увеличении температуры внешней среды ($T_e > 600$ К) времена задержки меняются не значительно (не превышают 10 %) при различных значениях силы тока $I=(0,1 \div 1,5)$ мА. Это говорит о том, что температура окружающей среды оказывает большее воздействие, чем мощность электроискрового импульса при таких условиях.

При понижении $T_e < 600$ К можно отметить, что времена задержки существенно изменяются при варьировании силы тока. Уменьшение I с 1 мА до 0,1 мА приводит к значительному росту τ_{ign} . Стоит отметить, что времена

задержки в данном диапазоне силы тока (от 0,1 до 1 мА) стремятся к бесконечности, что говорит о недостаточности мощности электрической энергии для воспламенения частицы ВУТ.

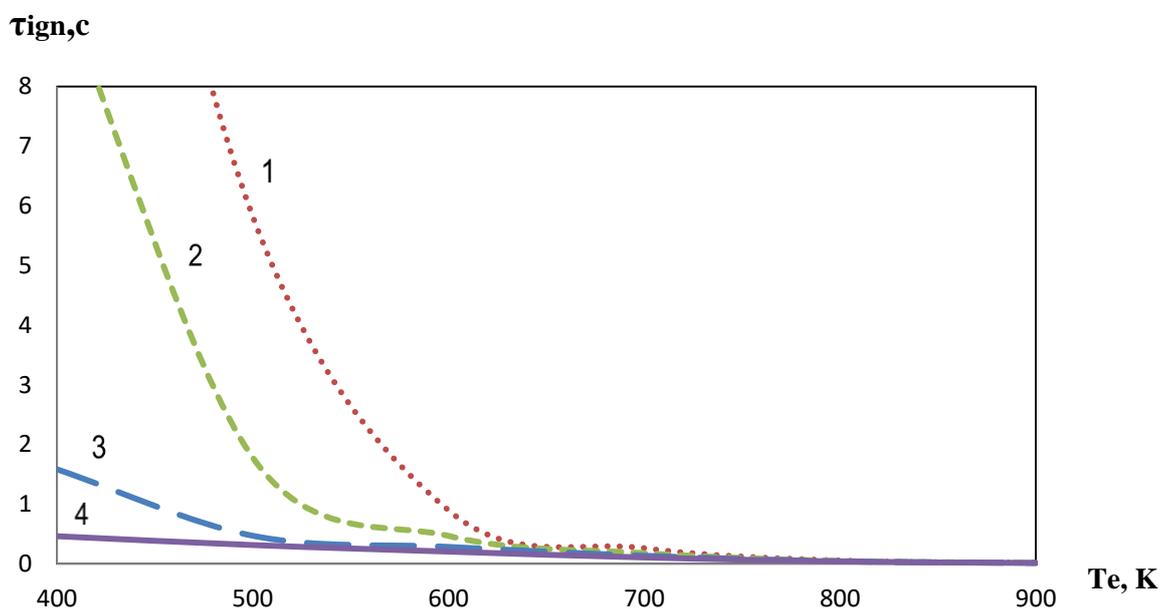


Рисунок 11 – Зависимость времени зажигания от температуры внешней среды при различной силе тока:

1 – $I=0,1$ мА; 2 – $I=0,5$ мА; 3 – $I=1$ мА; 4 – $I=1,5$ мА.

На рисунке 12 приведены температурные поля при $I=\text{const}=1$ мА в разные моменты времени, в условиях $T_e=\text{var}$. Процесс формирования фронта испарения и его локализации (рисунок 12 а, г) аналогичен описанию, рассмотренному в пункте 3.1. На рисунке 12 (б, д) видно, что образовавшаяся линия фронта испарения искажена, что обусловлено распределением потоков тепла в частице. Процесс термической деструкции и выхода летучих происходит при дальнейшем нагреве, при этом критические значения концентраций летучих приводят к воспламенению парогазовой смеси (рисунок 12 – в, е), зона которой находится вблизи поверхности частицы. Это объясняется тем, что процесс диффузии окислителя в область интенсивного взаимодействия газообразных продуктов пиролиза с воздухом, затрудняется вследствие формирования «барьера» парами воды.

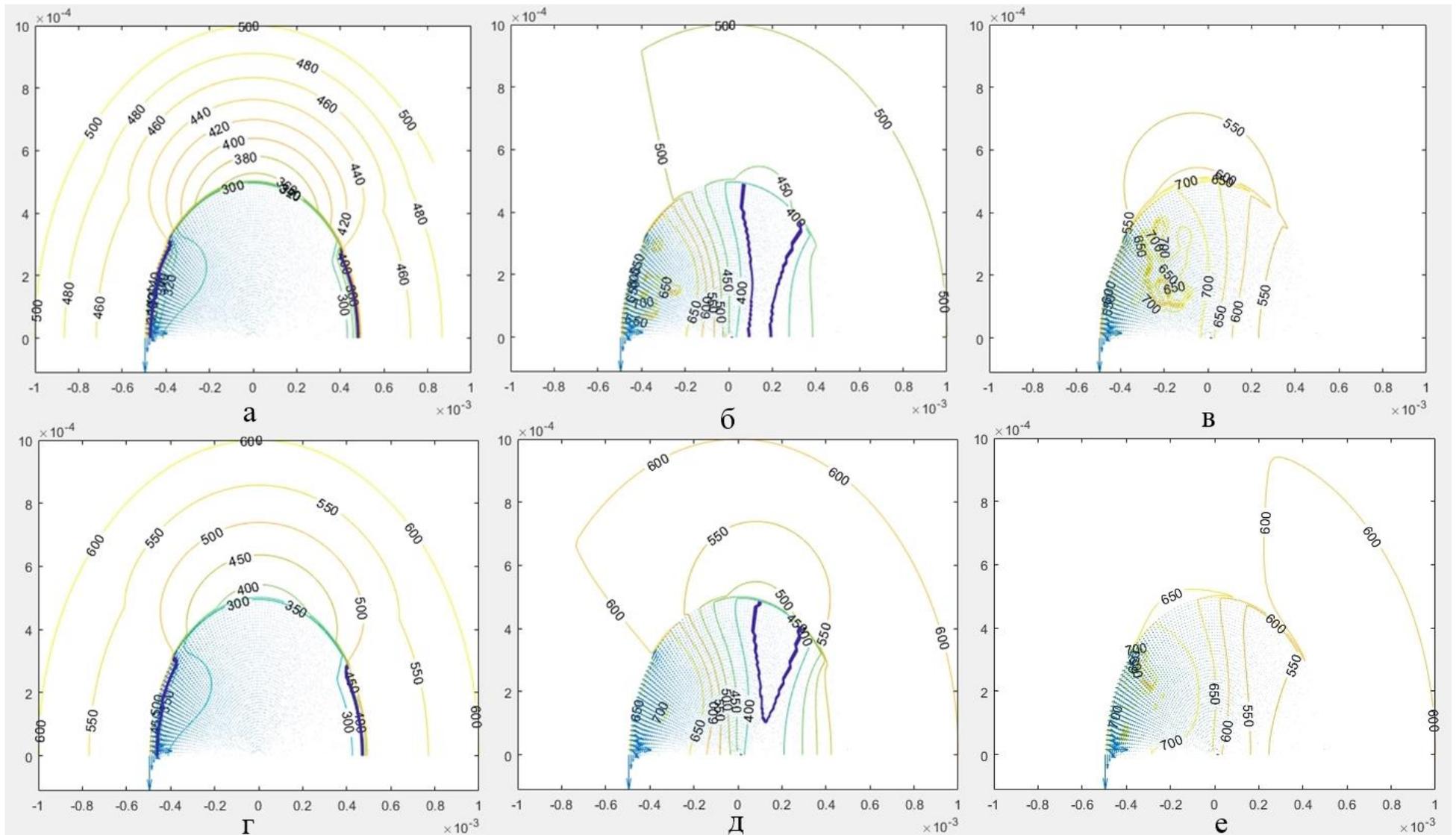


Рисунок 12 – Температурное поле при $I=1\text{ mA}$ в различные моменты времени: $T_e=500\text{K}$ – а, б, в; $T_e=600\text{K}$ – г, д, е.

а – $\tau=0,002\text{ c}$; б – $\tau=0,1\text{ c}$; в – $\tau=0,282\text{ c}$; г – $\tau=0,002\text{ c}$; д – $\tau=0,103\text{ c}$; е – $\tau=0,469\text{ c}$.

3.3 Влияние вида угля на характеристики и условия зажигания водоугольной частицы

Известно, что на характеристики зажигания углей существенное влияние оказывает степень их метаморфизма, марка и месторождение [43]. В составе ВУТ уголь с высоким содержанием летучих приводит к более интенсивному пламенному горению парогазовой смеси и, как следствие, ускоренному прогреву и зажиганию коксового остатка. Поэтому влияние индивидуальных термохимических (энергия активации, состав летучих, теплота термического разложения) и теплофизических (теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности) характеристик базового компонента (уголь) топлива на динамику термической подготовки и зажигания капель ВУТ является важным вопросом, требующим исследования.

На рисунке 13 приведены времена задержки зажигания капель водоугольного топлива от силы тока, выполненных из углей различных марок при постоянной температуре внешней среды. В качестве исследуемых видов угля выбраны: коксовый «К», тощий «Т», бурый «Б», теплофизические характеристики которых [44,45] представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Теплофизические свойства углей

Марка угля	Плотность	Теплоемкость	Теплопроводность	Энергия активации	Предэкспонент реакции	Тепловой эффект
	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·°С)	λ , Вт/(м·°С)	E , Дж/(моль)	k , 1/с	$Q_{тр}$, Дж/кг
К	1254	1070	0,128	$56,9 \cdot 10^3$	131	287,2
Т	1242	1000	0,134	$60,6 \cdot 10^3$	212	274,2
Б	1200	1150	0,151	$31,0 \cdot 10^3$	24	431

Анализ зависимостей показывает, что в условиях высоких значений силы тока ($I \geq 1$ мА) времена задержки зажигания частиц ВУТ, выполненных из углей различных марок, отличаются незначительно (не более 10%). В тоже время при $I \leq 1$ мА значения τ_{ign} для ВУТ отличаются существенно. Последнее, скорее всего, свидетельствует о том, что при воспламенении капель ВУТ определяющую роль играют теплофизические процессы (инертный нагрев за

счет радиации, конвекции, электроискровой нагрев, испарение воды), протекающие при термической подготовки, а не кинетика зажигания. Стоит отметить, что длительность периода зажигания определяется сочетанием теплофизических (теплопроводность λ , теплоемкость C , плотность ρ), термохимических (теплота термического разложения) свойств, а также мощностью электрического импульса.

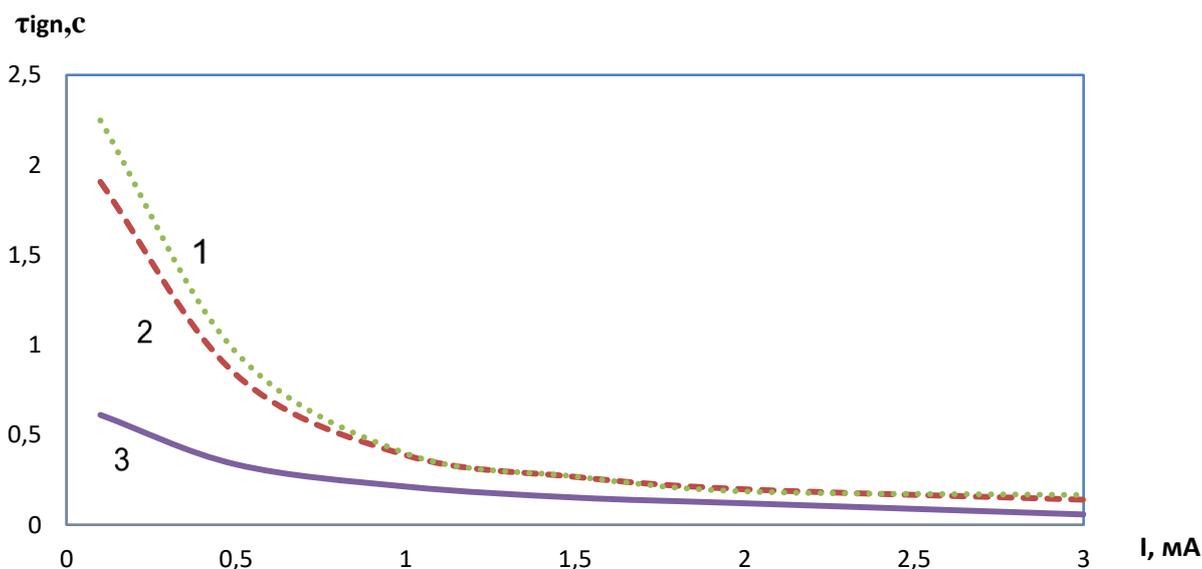


Рисунок 13 – Зависимость времени зажигания от силы тока при различных видах угля: 1 – коксовый уголь; 2 – тощий уголь; 3 – бурый уголь.

Анализируя рисунок 13, можно сделать вывод, что частицы ВУТ на основе бурого угля воспламеняются быстрее остальных во всем диапазоне значений силы тока (от 0,1 мА до 3 мА). Это обусловлено высокими значениями теплоемкости базового топлива и теплотой термического разложения по сравнению с другими углями. Также необходимо отметить, что данный уголь содержит достаточно большое количество летучих и углерода в своей структуре.

Времена задержки зажигания коксовых и тощих углей отличаются незначительно, это объясняется достаточно «близкими» по значениям теплофизическими свойствами (c , ρ , λ). Также стоит отметить, что в диапазоне значений I от 1 мА до 0,1 мА частицы ВУТ, выполненные из тощих углей,

зажигаются медленнее. Последнее обусловлено более низкой теплоемкостью и теплотой термического разложения базового топлива, а также низким содержанием летучих.

На рисунке 14 приведены температурные поля для разных видов топлива. Процесс воспламенения протекает аналогично процессу, описанного в пункте 3.1. Также стоит отметить, что на рисунке 14 (в, е) распределения температуры внутри частицы различно, это обусловлено отличающимися теплофизическими характеристиками топлива, а также теплотой термического разложения.

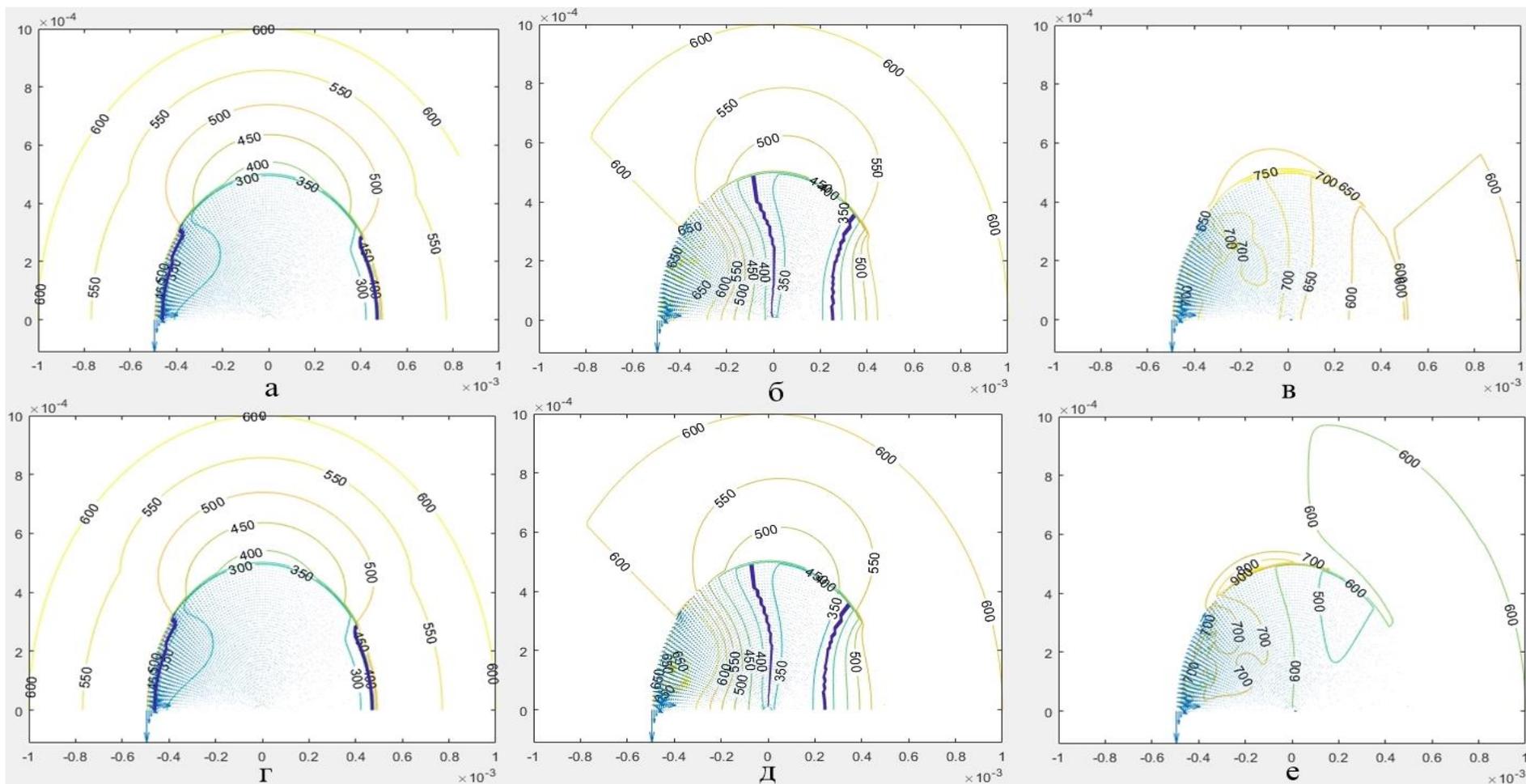


Рисунок 14 – Температурное поле при $T_e=600\text{K}$, $I=1\text{ mA}$ в различные моменты времени:

Тощий уголь – а, б, в; Бурый уголь – г, д, е.

а – $\tau=0,002\text{ c}$; б – $\tau=0,12\text{ c}$; в – $\tau=0,398\text{ c}$; г – $\tau=0,002\text{ c}$; д – $\tau=0,103\text{ c}$; е – $\tau=0,213\text{ c}$.

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

Студенту:

Группа	ФИО
5Б4Б	Арышева Наталья Викторовна

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Оклад научного руководителя – 19500р; оклад инженера – 17500 р..</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизация 20 % от стоимости компьютерной техники; накладные расходы 200% от затрат на заработную плату.</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления по страховым взносам составляют 30% от ФОТ</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Планирование процесса управления НИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Планирование научного исследования</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Смета затрат на научное исследование</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Определение практической значимости научного исследования</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Линейный план-график работ</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Наталия Геннадьевна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	Арышева Наталья Викторовна		

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Темой научного исследования (НИ) является математическое моделирование термической подготовки и зажигания частицы водоугольного топлива в условиях радиационно-конвективного и электроискрового нагрева применительно к камерам сгорания ДВС. Целью данного раздела является определение перспективности и успешности НИ.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

1. Техничко-экономическое обоснование НИ;
2. Планирование научно-исследовательских работ;
3. Составление сметы затрат НИ;
4. Определение ресурсной эффективности НИ.

С учетом решения данных задач была сформирована структура и содержание раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

4.1 Планирование работ и оценка времени их выполнения

Для выполнения научных исследований сформирована рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и инженер. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В таблице 2 представлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и время их выполнения.

Таблица 2 – План научно – технического исследования

Содержание работ	Должность Исполнителя	Продолжительность, дней
Разработка и выдача технического задания	Руководитель	1
	Инженер	
Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	20
Выбор методик и программных комплексов для работы	Инженер	2
Календарное планирование работ по теме	Руководитель	1
	Инженер	3
Составление математической модели	Руководитель	2
	Инженер	10
Проведение теоретических исследований	Инженер	20
Описание полученных результатов	Инженер	15
Обобщение и оценка результатов	Руководитель	4
	Инженер	6
Выводы по проделанной работе	Инженер	10
Оформление отчета по НИР	Инженер	20
Проверка работы руководителем, исправление ошибок	Руководитель	1
	Инженер	2
Утверждение ВКР руководителем	Руководитель	1
Итого	Инженер	109
	Руководитель	10

4.2 Расчет сметы затрат на научное исследование (НИ)

Затраты на осуществление НИ рассчитываются по следующим статьям расходов с последующим суммированием:

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

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

$K_{ам}$ – амортизация компьютерной техники;

$K_{з/пл}$ – затраты на заработную плату;

$K_{с.о}$ – затраты на социальные нужды;

$K_{пр}$ – прочие затраты;

$K_{накл}$ – накладные расходы.

4.2.1 Материальные затраты

Под материальными затратами понимается величина денежных средств, потраченных на канцелярские товары. Величину этих затрат принимаем 1000 руб.

4.2.2 Затраты на амортизацию

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

Амортизация компьютерной техники рассчитывается как:

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot C_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}}, \text{ руб./год,}$$

где $T_{исп.кт}$ – время использования компьютерной техники;

$T_{кал}$ – календарное время;

$C_{кт}$ – цена компьютерной техники;

$T_{сл}$ – срок службы компьютерной техники.

$$K_{ам} = \frac{109}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 1493,2 \text{ руб./год.}$$

4.2.3 Расходы на оплату труда

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 включают в себя выплаты инженеру, разрабатывающему проект, а также научному руководителю и рассчитываются как:

$$K_{з/пл} = ЗП_{инж}^{\phi} + ЗП_{нр}^{\phi} \text{ руб.},$$

$ЗП_{инж}^{\phi}$ – фактическая заработная плата инженера;

$ЗП_{нр}^{\phi}$ – заработная плата научного руководителя (ст. преподаватель – 19500 руб.).

Месячный оклад:

$$ЗП_{инж}^м = ЗП_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.};$$

$$ЗП_{нр}^м = ЗП_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 19500 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 27885 \text{ руб.},$$

где $ЗП_{инж}^м$ – месячная заработная плата инженера;

$ЗП_{нр}^м$ – месячная заработная плата научного руководителя;

$ЗП_0$ – месячный оклад;

K_1 – коэффициент, учитывающий отпуск, равен 1,1 (10%);

K_2 – районный коэффициент равен 1,3 (30%).

Фактическая заработная плата:

$$ЗП_{\phi} = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n^{\phi} \text{ руб.},$$

где $ЗП_{мес}$ – месячная заработная плата;

21 – среднее число рабочих дней в месяце;

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

Фактическая заработная плата инженера:

$$ЗП_{инж}^{\phi} = \frac{24310}{21} \cdot 109 = 126180,5 \text{ руб.}$$

Фактическая заработная плата научного руководителя:

$$ЗП_{нр}^{\phi} = \frac{27885}{21} \cdot 10 = 13278,6 \text{ руб.}$$

Общие затраты на заработную плату:

$$K_{з/пл} = 126180,5 + 13278,6 = 139459,1 \text{ руб.}$$

4.2.4 Затраты на социальные нужды

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).

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

$$K_{с.о} = 0,3 \cdot K_{з/пл} = 0,3 \cdot 139459,1 = 41837,7 \text{ руб.}$$

4.2.5 Прочие затраты

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

$$K_{пр} = (K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{з/пл} + K_{с.о}) \cdot 0,1$$

$$K_{пр} = (1000 + 1493,2 + 139459,1 + 41837,7) \cdot 0,1 = 18379,0 \text{ руб.}$$

4.2.6 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 200 % от затрат на заработную плату.

$$K_{\text{накл}} = K_{з/пл} \cdot 2 = 139459,1 \cdot 2 = 278918,2 \text{ руб.}$$

Смета затрат на научное исследование приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Смета затрат НИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НИ	1000
2. Затраты на амортизацию	1493,2
3. Расходы на оплату труда	139459,1
4. Затраты на социальные нужды	41837,7
5. Прочие затраты	18379,0
6. Накладные расходы	278918,2
Итого:	481087,2

Одним из наиболее перспективных технологических решений по оптимизации процессов сжигания угля является водоугольное топливо (ВУТ). Поэтому несмотря на значительные затраты на реализацию данного проекта, построение математической модели является рациональной задачей, так как на сегодняшний день воспламенение частиц ВУТ остается малоразработанной проблемой и данная технология имеет ряд нерешенных вопросов.

Математическая модель позволит установить основные закономерности процессов зажигания капель водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания ДВС, определить влияния основных значимых факторов на времена задержки зажигания, влияние условий теплообмена на предельные характеристики воспламенения, а также теплофизических характеристик топлива.

Теоретическая база будет являться востребованной при проектировании новых двигателей на таком топливе и различных исследованиях в области физики горения.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5Б4Б	Арышева Наталья Викторовна

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
Характеристика объекта исследования	Разработка математической модели процессов тепло- и массопереноса при зажигании частиц водоугольного топлива (ВУТ)
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность	– анализ вредных и опасных факторов – общая характеристика помещения – производственный шум. – электромагнитные и электростатические поля – ионизирующее излучение
2. Охрана окружающей среды	– анализ влияния объекта исследования на окружающую среду; – анализ влияния процесса исследования на окружающую среду.
3. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
4. Пожарная безопасность.	– анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований; – анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований; – мероприятия по предотвращению ЧС.
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Василевский Михаил Викторович	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	Арышева Наталья Викторовна		

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

Социальная ответственность – это сознательное отношение какого-либо субъекта социальной деятельности к требованиям социальной необходимости, социальных ценностей, норм, задач и правил, а также гражданского долга, понимание субъектом последствий осуществляемой деятельности для определенных социальных групп и личностей, для социального прогресса общества [46].

Социальная ответственность подразделяется на корпоративную и индивидуальную. Корпоративная социальная ответственность – это идея, в рамках которой организации учитывают интересы общества и возлагают на себя ответственность за влияние их деятельности на фирмы и прочие заинтересованные стороны современного общества [47]. Согласно данной концепции организации добровольно принимают дополнительные меры для повышения качества жизни работников, их семей, а также местного сообщества и общества в целом. При этом корпорации получают многочисленные преимущества от того, что работают на более широкую и продолжительную перспективу, чем собственная краткосрочная прибыль. Среди социальных вопросов на производстве особое место занимают работа по охране труда, окружающей среды и в чрезвычайных ситуациях [48].

5.1 Производственная безопасность

Целью данного раздела является выявление и анализ вредных и опасных факторов труда, определение необходимых мер защиты от них работающего персонала, оценка условий труда, микроклимата среды и предоставление рекомендаций по созданию оптимальных условий труда. Рассматриваются вопросы техники безопасности, пожарной профилактики и охраны окружающей среды.

Основные работы выполнены в 4-ом корпусе Томского Политехнического Университета (аудитория № 48).

5.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Поскольку работа за ЭВМ – это интеллектуальный труд, в рабочее время основная нагрузка у пользователя ЭВМ падает на центральную нервную систему. В связи с этим условия, в которых протекает работа, оказывают влияние на деятельность мозга. Длительная и интенсивная работа на компьютере может стать источником тяжелых профессиональных заболеваний.

Работа инженера тесно связана с компьютерной техникой, поэтому возникает дополнительное воздействие целой группы факторов, которые существенно снижают производительность труда. К таким факторам можно отнести: воздействие вредных излучений от монитора и компьютера, воздействие электромагнитных излучений, неправильная освещенность, ненормированный уровень шума, некомфортные метеорологические условия, высокое напряжение и другие [49].

5.2.1 Общая характеристика помещения

Объем рабочего помещения, где находится рабочее место разработчика, составляет $95,2 \text{ м}^3$, при ширине равной $5,2 \text{ м}$, длине $6,1 \text{ м}$ и высоте помещения 3 м . Площадь, соответственно равна $31,7 \text{ м}^2$. В данном помещении работает два человека. Следовательно, на одного человека приходится около $47,6 \text{ м}^3$ объема помещения и $15,85 \text{ м}^2$ площади, что в результате удовлетворяет требованиям санитарных норм СанПиН 2.2.2.542-96, согласно которым для одного работника-оператора должны быть предусмотрены площадь величиной не менее 6 м^2 и объем не менее 24 м^3 , с учетом максимального числа одновременно работающих в смену.

В рабочем помещении отсутствует принудительная вытяжная вентиляция. Имеется лишь естественная вентиляция. При естественной вентиляции на одного работающего человека необходим объем 40 м^3 (согласно

СНиП 2.04. 05-91). Таким образом, можно сделать вывод, что в данном помещении естественной вентиляции достаточно. В итоге можно сказать, что санитарные нормы соблюдены.

5.2.2 Производственный шум

К числу неблагоприятных факторов при выполнении работы инженером относится шум. При длительном воздействии на организм человека шум вызывает снижение остроты зрения, слуха, повышение кровяного давления, снижение внимания и т.д. Основным источником производственного шума в аудитории является шум работающих ЭВМ, питающие устройства и другие технические элементы. В соответствии с ГОСТ 12.1.003–83, в помещениях конструкторских бюро, расчетчиков, программистов установлен допустимый уровень звука, равный 50 дБА. Реально существующий уровень шума в рассматриваемом помещении составляет 48 дБА. Уровень шума в помещении при работе оператора не превышает 50 дБА, что удовлетворяет требованию ГОСТ 12.1.003–83.

5.2.3 Электромагнитные и электростатические поля

При работе с персональными компьютерами возникают электромагнитные поля (ЭМП). Источниками ЭМП являются видеотерминалы (ВДТ) на электронно-лучевых трубках.

Электромагнитное поле обладает способностью биологического, специфического теплового воздействия на организм человека. Последствия длительного воздействия электромагнитного поля могут быть следующие: повышенная утомляемость, головная боль, сонливость, боль в области сердца, гипертония, нарушение условно-рефлекторной деятельности, изменения межнейронных связей. Указанные явления могут быть слабо, умеренно или явно выражены [50].

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, напряженность ЭМП на расстоянии 50 см. вокруг ВДТ по электрической составляющей, должна быть не более:

– 5Гц – 2 кГц в диапазоне низких частот (25 В/м);

– 2 – 400 кГц в диапазоне высоких частот (2,5 В/м).

Все компьютеры, находящиеся в аудитории, поддерживают международный стандарт безопасности ТСО 95. Величина излучения от монитора, соответствующего этому стандарту составляет не более:

– 5Гц – 2 кГц в диапазоне низких частот (10 В/м);

– 2 – 400 кГц в диапазоне высоких частот (1 В/м),

т.е. уровень напряженности не превышает установленных норм.

Электростатическое поле возникает в результате облучения экрана потоком заряженных частиц. Неприятности, вызванные им, связаны с пылью, накапливающейся в электростатически заряженных экранах, которая летит на оператора во время его работы за монитором. Это может служить причиной кожных заболеваний, порчи контактных линз. Эксперты полагают, что низковольтный электромагнитный разряд способен изменять и прерывать клеточное развитие [50].

Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать 500В. Мониторы, удовлетворяющие стандарту ТСО 95, имеют электростатический потенциал, не превышающий 500В, это вполне соответствует требованиям безопасности.

5.2.4 Ионизирующее излучение

К числу вредных факторов для инженеров-программистов относится излучение. Источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить торможение функций кроветворных органов, нарушение нормальной свертываемости крови и увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение сопротивляемости организма инфекционным заболеваниям [51].

При работе дисплеев возникают побочные эффекты: генерация рентгеновского излучения от экрана и отражение. Для устранения последнего все дисплеи размещены вдоль стен. Прямое рентгеновское излучение

уменьшается за счет специального внутреннего покрытия экрана монитора и установки дополнительного защитного фильтра.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, доза рентгеновского излучения на расстоянии 0,05 м от экрана ПЭВМ не должна превышать 0,1 мбэр/час. Анализ радиационно-гигиенических характеристик отечественных телевизоров показывает, что мощность дозы уже на расстоянии 10 см от экрана не превышает предельных значений. Учитывая, что уровень излучения от экрана монитора имеет такое же, а в некоторых случаях меньшее, значение можно сделать вывод, что уровень излучения находится в пределах допустимого.

5.3 Охрана окружающей среды

Сегодня состояние окружающей среды требует от создателей новых технологий и машин пристального внимания к вопросам экологии. Любое техническое решение должно приниматься с учетом не только технологических и экономических требований, но и экологических аспектов [52].

Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий является безотходная технология. Под понятием «безотходная технология» следует понимать комплекс мероприятий в технологических процессах, от обработки сырья до использования готовой продукции. В результате чего сокращается до минимума количество вредных выбросов и уменьшается воздействие отходов на окружающую среду до приемлемого уровня. В этот комплекс мероприятий входят:

- создание и внедрение новых процессов получения продукции с образованием наименьшего количества отходов;
- разработка различных типов бессточных технологических систем и водооборотных циклов на базе способов очистки сточных вод;
- разработка систем переработки отходов производства во вторичные материальные ресурсы;

- создание территориально-промышленных комплексов, имеющих замкнутую структуру материальных потоков сырья и отходов внутри комплекса.

В области создания и внедрения безотходной технологии успехи достигнуты в ряде отраслей промышленности, однако полный перевод ведущих отраслей промышленности на безотходную технологию потребует решения большого комплекса весьма сложных технологических, конструкторских и организационных задач. Поэтому до всестороннего внедрения безотходной технологии важными направлениями экологизации промышленного производства считаются:

- совершенствование технологических процессов и разработку нового оборудования с меньшим уровнем выбросов примесей и отходов в окружающую среду;

- замена токсичных отходов на нетоксичные;
- замена не утилизируемых отходов на утилизируемые;
- применение пассивных методов защиты окружающей среды.

Пассивные методы защиты окружающей среды включают комплекс мероприятий по ограничению выбросов промышленного производства с последующей утилизацией или захоронением отходов. К их числу относятся:

- очистка сточных вод от примесей;
- очистка газовых выбросов от вредных примесей;
- рассеивание вредных выбросов в атмосфере;
- глушение шума на путях его распространения;
- мероприятия по снижению уровней инфразвука, ультразвука и вибраций на пути их распространения;

- экранирование источников энергетического загрязнения окружающей среды;

- захоронение токсичных и радиоактивных веществ.

Следует отметить, что проблема защиты окружающей среды требует усилий специалистов разного профиля. Особое значение имеет количественная оценка последствий загрязнения окружающей среды и оценка ущерба, нанесенного населению. В настоящей работе проводились исследования, которые могут стать базой для разработки нормативных методик, востребованных при проектировании новых двигателей, работающих на водоугольном топливе. Водоугольное топливо, в свою очередь, обладает рядом технологических и экономических преимуществ, а также и экологических [52].

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В аудитории используются средства вычислительной техники, поэтому необходимо проведение организационных и технических мероприятий, призванных обеспечить защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги и статического электричества. Разработка мероприятий и требований, направленных на устранение этих причин позволяет создать безопасные и благоприятные условия для труда человека.

Поражение человека электрическим током или электрической дугой может произойти в следующих случаях:

- при прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ПЭВМ;
- при однофазном (однополюсном) прикосновении незащищенного от земли человека к незащищенным токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, находящимся под напряжением, то есть в случае нарушения изоляции;
- при соприкосновении с полом и стенами, оказавшимися под напряжением;

- при возможном коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания, блоке развертки монитора.

Кроме того, не следует работать в условиях повышенной влажности (более 75%), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли или токопроводящих полов. Рабочее помещение по опасности электропоражения относится к помещениям без повышенной опасности, так как является сухим помещением с нормальной температурой воздуха, отсутствием пыли, изолирующими полами из ПВХ.

Во время работы с ПК для предупреждения электротравматизма очень важно проводить соответствующие организационные и технические мероприятия. К организационным мероприятиям относятся: доступ к работе, надзор во время работы, оформление перерыва в работе, переводов на другое рабочее место, окончания работы, вводный инструктаж на рабочем месте. Основными техническими мероприятиями являются: отключение оборудования на участке, выделенном для производства работ, и принятие мер против ошибочного или самопроизвольного включения; ограждение при необходимости рабочих мест и оставшихся под напряжением токоведущих частей; вывешивание предупредительных плакатов и знаков безопасности; проверка отсутствия напряжения; наложение заземления [50].

Особое внимание в данных мероприятиях уделяется защите от статического электричества. Наибольшие разрядные токи статического электричества возникают при прикосновении персонала к элементам ЭВМ. Такие разряды непосредственной опасности для человека не представляют, однако приводят к неприятным ощущениям в виде укола или толчка. Кроме того, разрядные токи статического электричества могут привести к выходу из строя ЭВМ.

Требования, предъявляемые к обеспечению электробезопасности пользователей, работающих на ПК, могут быть следующие:

- все узлы одного ПК и подключенное к нему периферийное оборудование должны питаться от одной фазы электросети;
- корпуса системного блока и внешних устройств должны быть заземлены радиально с одной общей точкой;
- для отключения ПК должен использоваться отдельный щит с автоматами защиты и общим рубильником;
- все соединения ЭВМ и внешнего оборудования должны производиться при отключенном электропитании.

5.5 Пожарная безопасность

Пожар в помещении наносит материальный ущерб, а также несет угрозу жизни и здоровья людей, находящихся в этом помещении.

Согласно общероссийским нормам технологического проектирования ОНТП 26-84, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. В рабочем помещении имеется электропроводка напряжением 220 вольт, предназначенная для питания вычислительной техники и освещения. При неправильной эксплуатации оборудования и коротком замыкании электрической цепи может произойти возгорание, которое грозит уничтожением техники, документов и другого имеющегося оборудования. Известно, что для отвода избыточной теплоты от ЭВМ служат системы вентиляции и кондиционирования воздуха. Однако системы вентиляции и кондиционирования могут стать дополнительными источниками распространения возгорания. Данное помещение относится к категории В [52].

Необходимо в аудитории проводить следующие мероприятия:

- пожарно-профилактические: организационные мероприятия, касающиеся технического процесса с учетом пожарной безопасности объекта; эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося

оборудования; технические и конструктивные, связанные с правильным размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов;

- организационные мероприятия: противопожарный инструктаж обслуживающего персонала; обучение персонала правилам техники безопасности; издание инструкций, плакатов, планов эвакуации;

- эксплуатационные мероприятия: соблюдение эксплуатационных норм оборудования; обеспечение свободного подхода к оборудованию.

Из вышесказанного следует, что дополнительных мер защиты не требуется.

К техническим мероприятиям относится соблюдение противопожарных требований при устройстве электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения. В рабочем помещении имеется 1 огнетушитель и общий обесточивающий рубильник, в случае возникновения пожароопасной ситуации необходимо обесточить помещение, используя огнетушитель ликвидировать очаг возгорания и эвакуироваться из помещения (рис. 15).

Наиболее дешевым и простым средством пожаротушения является вода, поступающая из обычного водопровода. Для осуществления эффективного тушения огня используют пожарные рукава и стволы, находящиеся в специальных шкафах. В пунктах первичных средств огнетушения должны располагаться ящик с песком, пожарные ведра и топор.

Если возгорание произошло в электроустановке, для его устранения должны использоваться огнетушители углекислотные типа ОУ-2, или порошковые типа ОП-5. Кроме устранения самого очага пожара нужно своевременно организовать эвакуацию людей.

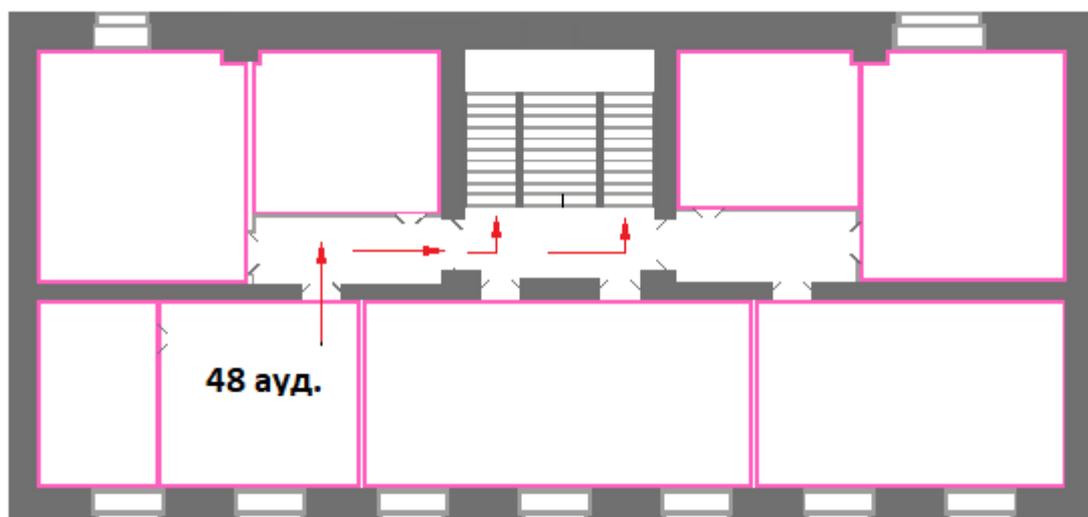


Рисунок 15 – План эвакуации

5.6 Заключение по разделу «Социальная ответственность»

Разработка математической модели зажигания частицы водоугольного топлива в камерах ДВС позволит установить основные закономерности процессов зажигания капель водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания ДВС.

Полученные теоретические данные будут являться необходимыми при проектировании новых двигателей, работающих на водоугольном топливе. Использование данных двигателей позволит значительно снизить отрицательное воздействие на окружающую среду.

В разделе проанализированы вредные и опасные факторы труда, разработаны меры защиты от них, оценены условия труда и микроклимата рабочей среды. Рассмотрены вопросы техники безопасности, пожарной профилактики и охраны окружающей среды, даны рекомендации по созданию оптимальных условий труда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Впервые постановлена и решена нелинейная нестационарная задача зажигания частицы водоугольного топлива в условиях сложного радиационно-конвективного и электроискрового нагрева применительно к камерам сгорания поршневых двигателей.

2. Численно исследованы основные закономерности процессов тепло- и массопереноса при зажигании частиц водоугольного топлива. Проведен анализ влияния группы значимых факторов на условия и характеристики зажигания:

- силы тока;
- температуры внешней среды;
- вида угля.

3. Установлено существенное влияние силы тока на условия и характеристики воспламенения. Проведенный численный анализ показал, что при различных значениях силы тока времена задержек зажигания значительно отличаются. При высоких значениях силы тока ($I > 1$ мА) частицы воспламеняются быстрее, в отличие от условий, когда значения силы тока меньше 1 мА. При этом установлены предельные режимы воспламенения капли ВУТ. В условиях относительно низкой силы тока ($I < 1$ мА) воспламенения частиц водоугольного топлива не происходит.

4. Исследовано влияние теплоизлучения внешней среды на характеристики и условия зажигания. Установлено два режима воспламенения: высокотемпературный и низкотемпературный с условной границе разделения (по T_e) 700 К. Показано, что при $T_e < 700$ К энергия электроискры оказывает преобладающее (по сравнению с интенсивностью радиационно-конвективного нагрева) влияние на условия и характеристики зажигания. В том случае, если

$T_e \geq 700\text{K}$ радиационно-конвективный нагрев оказывает наибольшее влияние на динамику зажигания частицы ВУТ.

5. Численный анализ влияния теплофизических и термохимических характеристик углей различных марок показал, что степень метаморфизма угля, из которого приготовлено водоугольное топливо, играет существенную роль в процессах воспламенения. Так частицы ВУТ, выполненные из бурых углей (Б), загораются быстрее, чем частицы, топливная составляющая которых состоит из тощих и коксовых углей. Последнее обусловлено более высоким содержанием летучих у угле марки «Б» по сравнению с углями марок «К» и «Т».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башмаков И. А. Центр энергоэффективности - XXI век (ЦЭНЭФ-XXI), Москва// Вопросы экономики 4 (2018) 49-75
2. Paolo Agnolucci. Volatility in crude oil futures: A comparison of the predictive ability of GARCH and implied volatility models// Energy Economics 31 (2009) 316–321
3. Q. Farooq Akram. Commodity prices, interest rates and the dollar// Energy Economics 31 (2009) 838– 851.
4. McGlade C, Speirs J, Sorrell S. A review of regional and global estimates of unconventional gas resources. London, UK: A Report to the Energy Security Unit of the Joint Research Centre of the European Commission; 2011
5. Jeroen Cuvelier, Koen Vlassenroot, Nathaniel Olin. Resources, conflict, and governance: A critical review// The Extractive Industries and Society 1 (2014) 340–350.
6. M.F. Gazulla, M. Ordu, S. Vicente, M. Rodrigo. Development of a WD-XRF analysis method of minor and trace elements in liquid petroleum products// Fuel 108 (2013) 247–25
7. Amela Ajanovic, Reinhard Haas. Dissemination of electric vehicles in urban areas: Major factors for success// Energy 115 (2016) 1451e145
8. Jia Ying Yong, Vigna K. Ramachandramurthy, Kang Miao Tan, N. Mithulananthan. A review on The state-of-the-art technologies of an electric vehicle, its impacts and prospect// Renewable and Sustainable Energy Reviews 49 (2015) 365–385.
9. Avinash Alagumalai. Internal combustion engines: Progress and prospects// Renewable and Sustainable Energy Reviews 38 (2014) 561–571
10. Ходаков Г.С. Водугольная суспензия в энергетике.// Теплоэнергетика. 2007. №1. С.35–45.

11. A. G. Morozov, S. I. Mosin, and V. I. Murko, "Use of Coal-Water Fuel in Thermal Power Engineering," *Energ., Ekon., Tekhn., Ekol.*, No. 4, 29–32 (2007).
12. Gengda Li, Shuiqing Li, Qian Huang, Qiang Yao. Fine particulate formation and ash deposition during pulverized coal combustion of high-sodium lignite in a down-fired furnace// *Fuel* 143 (2015) 430 — 437.
13. Choongsik Bae, Jaeheun Kim. Alternative fuels for internal combustion engines// *Proceedings of the Combustion Institute* 000 (2016) 1–25
14. J. Arroyo, F. Moreno, M. Muñoz, C. Monn, N. Bernal. Combustion behavior of a spark ignition engine fueled with synthetic gases derived from biogas// *Fuel* 117 (2014) 50–58
15. E. Porpatham, A. Ramesh, B. Nagalingam. Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine// *Fuel* 95 (2012) 247–256
16. Делягин, Г.Н. Обводненное твердое топливно-энергетическое топливо / Г.Н. Делягин, Б.В. Канторович // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. -М.: «Наука». — 1967. - С.5-13.
17. Belousov E.V. the development and improvement of solid-fuel reciprocating internal combustion engines. — Kherson: JSC KHGT, 2006. – 451p.
18. Г.С. Ходаков, Водоугольные суспензии // *Теплоэнергетика*. 2007. - №1, с. 35-45
19. Н. И. Редькина, Г. С. Ходаков, Е. Г. Горлов Суспензионное угольное топливо для двигателей внутреннего сгорания// *Химия твердого топлива*, 2013, № 5, с. 54–61
20. К. Кусаиынов, Г.К. Алпысова, Н.К. Танашева, А.Ж. Тлеубергенова, А.Б. Толынбеков. Влияние реагента пластификатора на свойства водоугольного топлива, синтезируемого на основе электрогидроимпульсной технологии
21. Серант Ф.А.1, Цепенюк А.И.2, Овчинников Ю.В.3, Луценко С.В.4, Карпов Приготовление водоугольного топлива и технологии его сжигания Е.Г.5

22. А. Рао, Р. Уилсон, М. Макмиллан, А. Кимберли // Современное машиностроение. Сер. А. 1990. №1. С. 163-173.
23. Ю.А. Толасов, В.С. Золотухин, Г.С. Ходаков, Технологические схемы приготовления водоугольного топлива // Технология приготовления и физико-химические свойства водоугольной суспензии // М: Нефтегазстройинформ, 1991. С. 78-97. (Тр. НПО «Гидротрубопровод»).
24. Caton J.A. The Development of Coal-Fueled Diesel Engines: A Brief Review // «Energy Information Annual», Vol. 17. – 1992. — P. A89-A97.
25. Siebers D.L., Dyer T.M. The Autoignition and Combustion of Coal-Water Slurry under Simulated Diesel Engine Conditions // «ASME Transactions – Journal of Engineering for Gas Turbines and Power», Vol. 108, №3. – 1986. – P. 652-660.
26. Nydick S.E., Prochet F., Steiger H.A. Continued Development of a Coal Water Slurry Fired Slow-Speed Diesel Engine A Review of Recent Test Results // «ASME Transactions – Journal of Engineering for Gas Turbines and Power», Vol. 109, №3. – 1987. – P. 465-476.
27. Caton J.A., Rosegay K.H. A Review and Comparison of Reciprocating Engine Operation Using Solid Fuels // «Transactions of the Society of Automotive Engineers», Vol. 82, №831362. – 1984. – P. 1108-1124.
28. Likos W.E., Ruan T.W. Experiments with coal fuels in a high temperature diesel engine // «ASME Transactions – Journal of Engineering for Gas Turbines and Power», Vol. 110, № 3. – 1988. – P. 444-452
29. Slurry-fueled diesels seen beneficial to cogeneration // «Cogeneration», Vol. 2, №4. – 1985. – P. 11-12.
30. Cooper-Bessemer coal-fueled engine system – progress report / Rao A.K., Wilson R.P., Balles E.N., Mayville R.A., McMillian M.H., Kimberley J.A. // «ASME Transactions – Journal of Engineering for Gas Turbines and Power», Vol. 110. № 3. – 1988. – P. 498-506

31. Bell S.R., Caton J.A. Cycle Simulations of a Coal Fueled. Reciprocating, Internal Combustion Engine: the Role of Volatiles and Liquid Carriers // Combust Science and Technology, Vol. 50. – 1986. – P. 185- 203.

32. Rosegay K.H., Caton J.A. Cycle Simulation of Coal Particle Fueled Reciprocating Internal- Combustion Engines // M.S. Thesis. Texas A&M University – Paper № 831699, December 1982. – P. 895-908.

33. Efficient and low-smoke combustion of various low-grade fuel in high-speed small diesel engines / Murayama T., Miyamoto N., Chikahisa T., Tosaka S. // «ASME Transactions – Journal of Engineering for Gas Turbines and Power», Vol. 110, № 3. – 1988.– P. 385-392.

34. Bell S.R., Caton J.A. Cycle Simulations of a Coal Fueled. Reciprocating, Internal Combustion Engine: the Role of Volatiles and Liquid Carriers // Combust Science and Technology, Vol. 50. – 1986. – P. 185- 203.

35. Seshadri A.K., Caton J.A., Kihm K.D. Coal-Water Slurry Spray Characteristics of a Positive Displacement Fuel Injection System // «ASME Transactions – Journal of Engineering for Gas Turbines and Power», Vol. 114, №3. – 1992. – P. 528-533.

36. G.H. Choi, S. R. Bell. Investigation of coal-water slurry fuel combustion in reciprocating, internal combustion engine// December 1994, Volume 8, Issue 4, pp 356–363

37. Самарский А. А. Локально-одномерные разностные схемы на неравномерных сетках//Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1963. – Т.3, №3. – с. 431 – 466.

38. Кузнецов Г.В., Саломатов В.В., Сыродой С.В. Численное моделирование зажигания частиц водоугольного топлива//Физика горения и взрыва. – 2015. – Т.51. № 4. – с.11-19.

39. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. — Москва: Физматлит, 2013. — 430 с.: ил.. — Библиогр.: с. 405-423.

40. Сыродой, С. В. Математическое моделирование воспламенения частицы водоугольного топлива / С. В. Сыродой, Г. В. Кузнецов // Перспективы развития фундаментальных наук [Электронный ресурс]: труды XI международной конференции студентов и молодых учёных.

41. Кузнецов, Г. В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет; Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2007. — 173 с.: ил.. — Библиогр.: с. 171-172.

42. Саломатов В.В. Состояние и перспективы угольной и ядерной энергетик России //Теплофизика и аэромеханика. – 2009. – Т.16, №4. – С. 531-544.

43. Сыродой, С. В. Зажигание частицы водоугольного топлива путем подвода лучисто-конвективного тепла

44. Померанцев В.В. Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат, 1986. – с. 312.

45. Агроскин А.А. Физические свойства углей. М.: Metallurgizdat, 1961. – с. 256.

46. Назаренко О.Б. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / О.Б. Назаренко, Ю.А. Амелькович; Томский политехнический университет. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 178 с.

47. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы. – М.:Минздрав России, 1997.

48. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М. : Изд-во стандартов., 1980.

49. Кривошеин Д.А.. Экология и безопасность жизнедеятельности: Учеб. пособие для вузов / Д.А. Кривошеин, Л.А. Муравей, Н.Н. Роева и др.; Под. Ред. Л.А. Муравья. – М. ЮНИТИ-ДАНА, 200. - 447 с.

50. ГОСТ Р 50923-96 Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения. – М.: Изд-во Госстандарта России, 1996.

51. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам». – М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003.

52. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистров всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ На/Сост. Романенко С.В., Анищенко Ю.В., – То Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 28 с.