

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ**
Направление подготовки **Теплоэнергетика и теплотехника**
Кафедра **теоретической и промышленной теплотехники**

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Зажигание частиц влажной древесины в высокотемпературной среде

УДК 536.46:674.04

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БЗБ	Бугаева Ксения Андреевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Сыродой С.В.	К.Т.Н		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Василевский М.В.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТПТ	Кузнецов Г.В.	д.ф.-м.н., профессор		

Томск – 2017 г.

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

Код резу льта та	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 с учетом 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»

Институт ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой ТПТ
Кузнецов Г.В.
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студент:

Группы	ФИО
5Б3Б	Бугаева Ксения Андреевна

Тема работы:

Зажигание частиц влажной древесины в высокотемпературной среде	
Утверждена приказом ректора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(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.).</i>	Объект исследования – частицы влажной древесины различной формы и размеров. Предмет исследования – интегральные характеристики процессов зажигания частиц влажной древесины.
--	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <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>	Анализ литературы по направлению исследования; разработка математической модели зажигания древесных частиц, разработка методики проведения экспериментальных исследований процесса зажигания древесных частиц; определение области варьирования факторов; проведение серии экспериментов; анализ экспериментальных данных, определение влияния размера, влажности, формы частицы на время задержки зажигания; сравнение полученных результатов аналитического расчет с экспериментальными данными.
Перечень графического материала	15 слайдов
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кузьмина Наталия Геннадьевна, ст. преподаватель каф. МЕН
Социальная ответственность	Василевский Михаил Викторович, доцент каф. ЭБЖ

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Сыродой С.В.	К.Т.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БЗБ	Бугаева Ксения Андреевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 71 с., 12 рис., 3 табл., 55 источников.

Ключевые слова: биотопливо, влажная древесина, тепломассоперенос, время задержки зажигания, математическое моделирование, экспериментальные исследования, характеристики зажигания.

Объектом исследования являются частицы влажной и сухой древесины различной формы и размеров.

Цель работы – экспериментальное и теоретическое исследование условий и характеристик зажигания одиночных частиц древесины в потоке высокотемпературных газов в рамках математической модели, учитывающей эндотермические процессы испарения влаги, содержащейся в древесине, и термического разложения.

В процессе исследования проводились эксперименты по определению влияния температуры окружающей среды, влажности и формы частиц древесины на характеристики и условия их зажигания.

Степень внедрения: результаты внедрены в учебный процесс.

Область применения: результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в работе, в перспективе могут стать базой для разработки государственных и отраслевых стандартов, а также нормативных методик проектирования топочных устройств котельных агрегатов, работающих на древесном топливе.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Принятые обозначения:

T – температура, К;

σ – константа излучения абсолютно черного тела, $W/(m^2 \cdot K^4)$;

ε – интегральная степень черноты;

α – коэффициент конвективной теплоотдачи, $W/(m^2 \cdot K)$;

p – давление, Па;

η – доля термически разложившегося вещества;

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

U – скорость водяных паров в радиальном направлении, m/s;

m – пористость;

Z – степень сжимаемости водяного пара 1/Па;

K_p – степень проницаемости пористой структуры, m^2 ;

ν – динамическая вязкость, Па·с;

Q – тепловой эффект, J/kg;

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

C – теплоемкость, Дж/(кг · К);

ρ – плотность, кг/м³;

r – радиус, м;

θ – азимутальный угол, рад.;

n – единичный вектор направления движения фронта испарения, м;

L – длина, м;

h – шаг разностной сетки по пространству, м;

t – время, с;

τ – шаг по времени, с;

N – количество узлов разностной сетки.

Подстрочные индексы:

0 – начальный момент времени;

1 – область исходного «влажного» топлива;

2 – область «сухого» топлива;

3 – алюминий;

e – граница раздела системы «влажное топливо – обезвоженная часть»;

f – состояние воды при температуре замерзания;

F – фронт испарения;

g – высокотемпературный газ;

i – номер реакции;

s – пар;

W – проволока термопары;

Al – граница раздела системы «древесная частицы – спай термопары»;

atm – атмосфера;

ign – зажигание;

env – окружающая среда (воздух в лаборатории);

out – внешний;

std – начало термического разложения;

sur – поверхность;

wat – вода в жидком состоянии.

Оглавление

Введение.....	11
<i>Экономическое обоснование использования древесины в качестве топлива</i>	<i>11</i>
<i>Проблемы внедрения древесины в качестве топлива</i>	<i>13</i>
1 Обзор литературы	15
1.1 <i>Краткий обзор экспериментальных исследований процесса воспламенения частиц древесины</i>	<i>15</i>
1.2 <i>Краткий обзор моделей воспламенения частиц древесины</i>	<i>17</i>
2 Методика эксперимента	19
3 Постановка задачи.....	21
3.1 <i>Физическая постановка</i>	<i>21</i>
3.2 <i>Математическая постановка задачи</i>	<i>22</i>
3.3 <i>Тестовые задачи</i>	<i>27</i>
4 Результаты экспериментального и теоретического исследования процессов зажигания частиц влажной древесины	32
4.1 <i>Зажигание частиц влажной древесины в среде высокотемпературных газов</i>	<i>32</i>
4.2 <i>Влияние начальной влажности древесины на характеристики и условия зажигания</i>	<i>35</i>
4.3 <i>Влияние формы частиц древесины на характеристики и условия зажигания</i>	<i>37</i>
4.4 <i>Рекомендации по конструированию топочных устройств котельных агрегатов, работающих на древесном биотопливе.....</i>	<i>40</i>
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	44
5.1 <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения..</i>	<i>44</i>
5.1.1 <i>Планирование работ и оценивание времени их выполнения</i>	<i>44</i>
5.1.2 <i>Смета затрат на проект.....</i>	<i>47</i>
5.2 <i>Смета затрат на оборудование и монтажные работы.....</i>	<i>50</i>
5.3 <i>Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>50</i>

6 Социальная ответственность	53
6.1 Производственная безопасность.....	54
6.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования	54
6.1.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследований	55
6.1.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.	55
6.2 Экологическая безопасность	56
6.2.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду	57
6.2.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду	57
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	58
6.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.....	58
6.3.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований	59
6.3.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.....	59
6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	60
6.4.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства	60
6.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	62
6.5 Заключение по разделу «Социальная ответственность».....	63
Заключение	64
Список использованных источников	66

Введение

Экономическое обоснование использования древесины в качестве топлива

Значительная часть территории Российской Федерации относится к лесной зоне [1], в которой произрастают лиственные и хвойные деревья. Последние широко применяются в качестве сырья [2] для лесоперерабатывающей промышленности. В процессе производства образуется огромное количество отходов, объем которых не только соизмерим с объемом получающейся продукции, но зачастую и превосходит его [3].

В деревообработке общая масса отходов при современном уровне развития составляет 32,5 млн т с энергосодержанием 16 млн т.у.т. Годовой прирост древесины составляет 920–950 млн м³, из которых полезно используется лишь 186 млн м³, то есть более 730 млн м³ древесины расходуется непроизводительно [4], с убытком для экосистемы лесов (гниет, сгорает, переставает). При ее переработке можно было бы получать более 250 млн т биотоплива в год.

Очевидно, что древесные отходы, обладая значительной теплотворной способностью и хорошей горючестью, могут использоваться в качестве топлива [5]. Такое применение их в системах коммунального теплоснабжения технически возможно и экономически целесообразно при условии их соответствующей модификации.

В последние годы в ряде регионов древесная биомасса становится все более привлекательной в качестве топлива для тепловых электрических станций [6-8]. Вызвано это, в первую очередь, ежегодным ростом цен на энергоносители [9]. Постоянно увеличивающаяся стоимость выработки тепловой и электрической энергии при применении традиционных видов топлива (уголь, мазут или природный газ) создает предпосылки для нового комплексного решения в области технологий теплоэнергетики [10]. Таким

решением может стать использование в качестве альтернативного топлива отходов лесопереработки, которые в настоящий момент используются очень ограниченно [11], а свалки этих отходов становятся серьезной экологической проблемой.

Тенденция использования древесины в качестве топлива имеет место не только в США, но и в восточной Европе [12]. Так, к 2020 г. в Европейском Союзе уровень использования возобновляемых источников энергии, в частности биотоплива, должен дойти до 20 % и в дальнейшем увеличиться до 25 % [13]. Например, самая современная тепловая электростанция Avedøre (Дания) [14, 15] со второй половины 2016 г. уже полностью перешла на сжигание древесных гранул.

Заинтересованность в древесном топливе объясняется наличием ряда несомненных преимуществ его по сравнению с традиционными видами твердых (уголь), жидких (мазут) и газообразных (природный газ) видов энергоносителей [16-19]. В первую очередь древесина является единственным возобновляемым видом топлива [16] во многих регионах Северной и Южной (особенно) Америки, Азии и Африки. В условиях постоянно меняющейся энерго-политической конъюнктуры в мире, связанной с существенно неравномерным распределением нефтяных ресурсов и природного газа на планете [17] и их ограниченностью [18], древесина (которая распространена в пяти частях света) может стать фактором снижения мировой напряженности и «сгладить» турбулентную динамику мировых цен на углеводороды [19]. Также необходимо отметить, что при сжигании древесных гранул формируется намного меньше (в 5 раз) окислов азота и серы [20] (по сравнению с углем). Последнее связано в первую очередь с относительно низкими температурами горения древесины [21]. Немаловажным является и то, что в качестве сырья для производства топлива на основе древесной биомассы могут использоваться отходы деревообрабатывающей промышленности [21]. Хранение последних сопровождается большими проблемами вследствие их высокой пожарной

опасности. По этой причине наиболее целесообразным является использование [22-24] такой древесины в качестве твердого топлива для малогабаритных котельных агрегатов (а в перспективе и крупных ТЭС) или в качестве сырья для получения жидкого биотоплива, биогаза и биоугля [25-27]. Создание дешевого энергетически эффективного возобновляемого топлива из отходов деревообрабатывающей промышленности позволит существенно снизить затраты на производство энергии и одновременно позволит решить вопрос утилизации отходов.

Помимо всего прочего, внутри нашей страны на сегодняшний день остро стоит проблема энергосбережения [28]. Решить ее можно посредством производства и использования биотоплива. Кроме того, законодательное ограничение потребления минерального топлива во многих странах заставило пересмотреть применение возобновляемых источников энергии [29].

Проблемы внедрения древесины в качестве топлива

Однако технологии высокой переработки древесины в целях энергетики не доведены пока до крупномасштабного применения по целому ряду объективных причин. Основной является сложность и высокая стоимость оборудования технологического цикла (газогенератор, охладитель, очистители и скрубберы) [30]. Переработка любой биомассы (в том числе и древесной) с целью получения жидких или газообразных топлив протекает при повышенных температурах – умеренных (до 500К) и высоких (до 900К) при медленном или импульсном пиролизе, соответственно. Очевидно, что для осуществления такого производственного цикла необходимо специальное оборудование и энергетические установки. Однако, их экономическая эффективность пока низка [31].

Следует также обратить внимание на то, что применение необработанного (измельченного) и неподготовленного (непрессованного)

древесного топлива на котельных не обосновано и может привести к существенному ухудшению работы котельного агрегата и снизить выработку тепловой энергии. Поэтому для эффективного сжигания в топках энергетических и водогрейных котлов могут использоваться не любые отходы, а специально произведенные для этих целей. Например, в Финляндии производством топливной щепы занимаются специальные заводы [32]: для достижения эффективности топливо должно быть однородным по фракции, подготовленным по влажности, а также соответствовать необходимым экологическим требованиям.

Соответственно, по современным европейским теплоэнергетическим показателям перспективным является сжигание древесных топливных гранул (пеллет) [33] – продукт наиболее глубокой переработки отходов древесной биомассы, или топливные брикеты. Пеллеты менее подвержены самовоспламенению, так как не содержат в себе пыли и спор [34]. Недостатком их применения является проблема их транспортировки на большие расстояния, в ходе которой происходит разрушение значительного количества пеллетов [35], а также снижение их теплотворных свойств. Следует также отметить, что производство пеллет является очень энергозатратным. При этом необходимо проводить некоторые операции для подготовки сырья [36].

На основании анализа современного состояния проблемы использования древесины в теплоэнергетике [37] можно сделать вывод, что на настоящее время сжигание древесных гранул является наиболее перспективным направлением утилизации древесных отходов. Но пока не разработана теория, позволяющая проводить прогностическое моделирование условий и характеристик зажигания даже сухих мелких, средних и крупных частиц или гранул древесины в потоке высокотемпературных газов.

Экспериментальные и теоретические исследования процессов воспламенения в связи с большим числом факторов (дисперсность; наличие

внешней и связанной влаги; влияние возраста древесины, способа переработки, форма частиц и др.), объективно влияющих на условия зажигания одиночных частиц древесины, существенно затруднено. Необходимо отметить, что как правило древесина является существенно неодородным и анизотропным материалом [38], состоящим из различных (по своим физическим свойствам) структурных элементов [39]. Соответственно, характеристики теплопереноса в таких структурах будут существенно отличаться от условий теплопроводности в монолитных веществах (например, металлы). Кроме того, недостаточно хорошо изучена кинетика процессов зажигания даже основных разновидностей древесной биомассы. При термическом разложении древесины выделяются газообразные (летучие) вещества. Состав последних может быть разнообразным и включать как способные к окислению вещества (например, CO, CH₄, H₂), так и балластные компоненты газовой смеси (N₂, CO₂), затягивающие процесс воспламенения [40].

1 Обзор литературы

К настоящему времени опубликовано мало работ с результатами как экспериментальных, так и теоретических исследований процессов зажигания древесины.

1.1 Краткий обзор экспериментальных исследований процесса воспламенения частиц древесины

Большое количество имеющихся на сегодняшний день экспериментальных исследований процесса зажигания древесины [41-46] имеют существенные отличия от экспериментов, проведенных в данной работе.

Например, в работе [41] рассматривалось зажигание крупных ($\delta > 10$ мм) частиц древесины, что значительно замедляет процесс проведения эксперимента. В энергетике, как правило, используются частицы, размеры фракции которых составляют до 3 мм. Соответственно, можно обоснованно предположить, что результаты [41] полезны для понимания механизмов зажигания, но не имеют практического значения с точки зрения большой и малой энергетики.

В [42] нагрев и зажигание частиц древесной биомассы проводились не в воздухе, а при непосредственном соприкосновении их с поверхностью нагрева. В топочном пространстве котельного агрегата зажигание происходит за счет интенсивного радиационного и конвективного нагрева. Соответственно применение результатов [42] с целью проведения научно-исследовательских и конструкторских работ при проектировании камер сгорания, работающих на древесине, малообоснованно и может привести к существенным конструктивным ошибкам и снизить эффективность работы камеры сгорания.

В [43] зажигание частиц производилось посредством горелки, при этом на входе в горелку регулировалась концентрация кислорода. В работе [44] зажигание древесных частиц проходило в атмосфере азота и углекислого газа. Очевидно, что такие экспериментальные установки являются более сложными по конструкции, следовательно, и дорогостоящими. К тому же, в реальных условиях зажигание топлива происходит в воздушной среде камеры сгорания, где окислителем является воздух. Следовательно, такое исследование не может использоваться в целях разработки рекомендаций при проектировании топочных устройств, а лишь рассматривает некоторые частные случаи сжигания топлива.

В работе [45] рассматривалось самовоспламенение древесины, что позволяет анализировать опасность складирования отходов древесины, но не подходит для оценки возможности использования древесной биомассы в качестве топлива.

1.2 Краткий обзор моделей воспламенения частиц древесины

Подавляющее большинство теоретических исследований выполнено в рамках очень простых математических моделей [46-50], которые не учитывают реальный комплекс физико-химических процессов, протекающих совместно при интенсивном нагреве частиц древесины (теплообмен между частицей и внешней высокотемпературной средой за счет конвекции и излучения, теплопроводность, испарение влаги, фильтрация водяных паров к поверхности нагрева, термическое разложение древесины с образованием газообразных продуктов и золы, термохимическое взаимодействие паров воды и углерода кокса, окисление химически активных продуктов пиролиза кислородом воздуха, диффузия горючих компонентов в прилегающем к поверхности частицы слое внешней среды). При этом необходимо отметить, что формальное использование методов прогностического моделирования процессов тепло- и массопереноса при зажигания твердых [51] и жидких топлив [52], а также огнезащитных материалов [53] невозможно в связи с тем, что механизм зажигания древесины существенно отличается в связи с достаточно значимым влагосодержанием от механизмов зажигания, например, высокоэнергетических веществ.

Разработанные на настоящее время математические модели зажигания одиночных частиц древесного топлива и их совокупности [46-50], как правило не учитывают неоднородность полей температур, обусловленную изменением теплофизических свойств при удалении влаги и термическом разложении топлива в процессе его подготовки топлива к зажиганию. Например, в [46] приведены результаты численного анализа процесса воспламенения слоя древесины, полученные при решении уравнения теплопроводности с квазилинейными граничными условиями. Процессы термического разложения, сопровождающиеся выделением летучих, в [46] не рассматривались. В [47, 48] приведены результаты вычислительных экспериментов, с использованием модели теплового баланса, учитывающей

теплоприток от внешней среды и тепловой эффект химической реакции. Соответственно, при таком подходе не учитывается неоднородность температурного поля как по пространству, так и во времени. В [49] приведены результаты зажигания слоя древесины с учетом термического разложения и формирования слоя горючих газов. Однако, при этом в [49] принята гипотеза об однородности температурного поля газовой (пристенной) области. Последнее является существенно упрощающим процедуру моделирования допущением. Наиболее подробно (с математической точки зрения) рассмотрено зажигание древесной частицы в [50]. Эта модель учитывает теплопроводность в слое древесины, пиролиз топлива, выход летучих и процессы, протекающие в газовой фазе. При этом стоит отметить, что не рассмотрено испарение влаги (как внешней, так и внутренней) и неоднородность химического состава летучих.

Можно сказать, что модели [46-50] удовлетворительно описывают процесс воспламенения только очень маленьких сухих частиц древесины (до 10^{-4} м). Однако, измельчение древесины до дисперсности на уровне 0,1-0,5 мм нецелесообразно по многим причинам (основная – большие затраты энергии на диспергирование [54]). По этой причине наиболее рационально измельчение древесной биомассы до фракционного состава в несколько миллиметров ($1 \div 3 \cdot 10^{-3}$ м). В этом случае даже в условиях нагрева сухих частиц градиенты температур по основной координате, например, по радиусу (для частиц сферической формы), могут быть достаточно большими и играть важную роль при подготовке к зажиганию. Необходимо отметить, что в реальной энергетике влажность древесины всегда не равна нулю. Затраты энергии на фазовый переход при испарении воды велики. По этой причине прогрев приповерхностного слоя частицы в условиях испарения влаги будет протекать с существенно меньшей, по сравнению с сухой древесиной, скоростью. При этом испарение как правило происходит в очень узкой (намного меньше линейного размера частицы), постоянно перемещающейся зоне (фронт испарения). Скорость движения фронта лимитируется его

температурой. Также стоит отдельно сказать, что при нагревании древесины происходит термическое разложение, сопровождающееся выходом летучих. Химический состав последних разнороден и включает группу горючих компонентов. Соответственно, можно обоснованно предположить, что окисление такой газовой смеси будет характеризоваться набором химических реакций как экзотермических, так и эндотермических.

Обобщая вышеизложенное можно сделать вывод, что известные математические модели зажигания древесины [46-50] пока не учитывают протекающее в индукционный период процессы: испарение влаги (протекающее во фронте), содержащейся в древесине; фильтрация паров воды к поверхности нагрева; термохимическое взаимодействие водяного пара и углерода кокса, а также продуктов пиролиза и внешнего окислителя в малой области вокруг частицы; диффузия водяных паров и продуктов термического разложения во внешней среде. Соответственно, разработка математической модели зажигания древесины в условиях, соответствующих топочному пространству котельных агрегатов является актуальной и не решенной до настоящего времени задачей.

Цель работы – экспериментальное и теоретическое исследование условий и характеристик зажигания одиночных частиц древесины в потоке высокотемпературных газов в рамках математической модели, учитывающей эндотермические процессы испарения влаги, содержащейся в древесине, и термического разложения.

2 Методика эксперимента

Экспериментальные исследования проведены на стенде, приведенном на рисунке 1. Частица древесины закреплялась на керамическом держателе и вводилась дистанционно-управляемым координатным устройством в полый керамический цилиндр, внутренняя поверхность которого нагревалась до температуры 1473К. Регистрация процессов тепломассопереноса и

воспламенения топливной частицы проводилось высокоскоростной видеокамерой Photron FASTCAM CA4 (скорость видеосъемки до 20 000 кад/с). Температура воздуха внутри цилиндра (T_e) в экспериментах варьировалась в достаточно широком диапазоне (от 800K до 1473K).

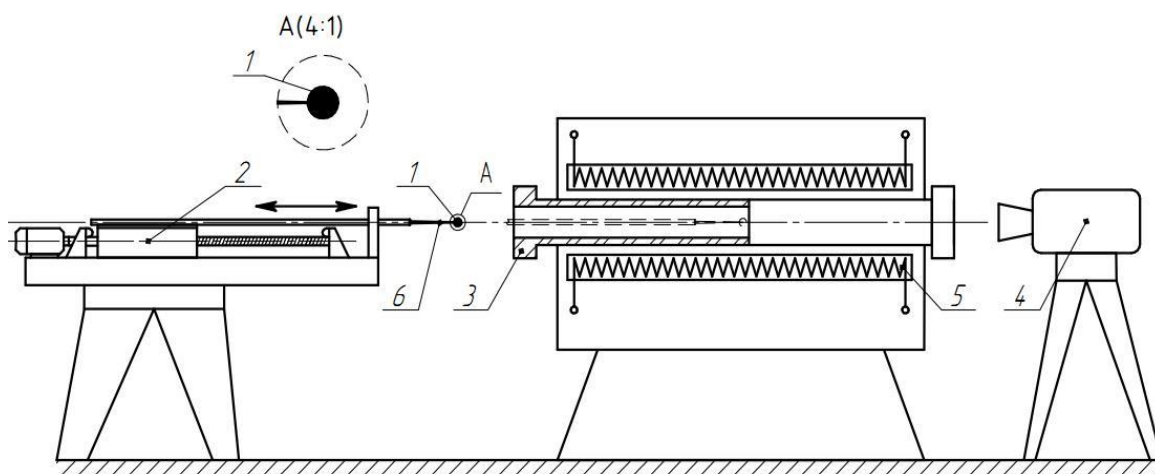


Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки

1 – деревянная частица; 2 – координатное устройство; 3 – полый керамический цилиндр; 4 – высокоскоростная видеокамера; 5 – нагревательный элемент; 6 – игла-держатель.

Период времени от начала теплового воздействия (момент ввода в полость цилиндра) до зажигания (появление пламени) считался временем задержки воспламенения (t_{ign}). Размеры частиц варьировались в диапазоне $1 < \delta < 3 \cdot 10^{-3}$ м. Систематическая погрешность определения основных измеряемых параметров (T_e , t_{ign}) составляла не более 5 %. Доверительный интервал определения t_{ign} при доверительной вероятности 0,95 не превышал 17 %.

3 Постановка задачи

3.1 Физическая постановка

Принята физическая модель процессов тепло- и массопереноса (инертный нагрев, теплоперенос теплопроводностью) в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и физико-химических (термическое разложение, выход летучих, взаимодействие водяных паров и углерода, газофазное воспламенение продуктов пиролиза) превращений, протекающих совместно, соответствующая условиям эксперимента и установленным при его проведении закономерностям.

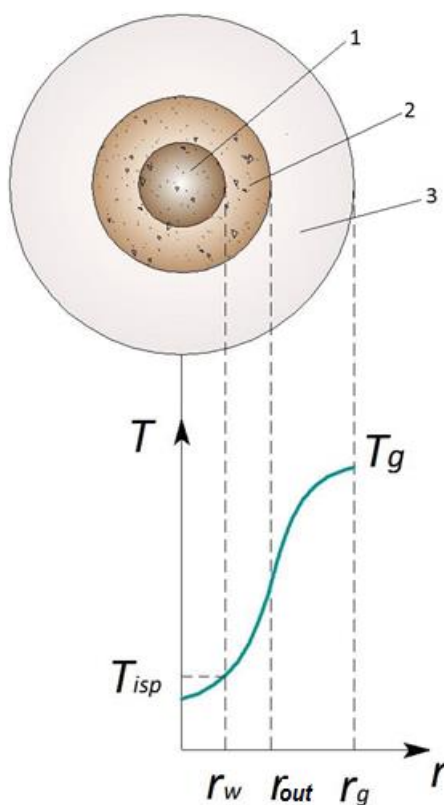


Рисунок 2 - Схема области решения задачи

1– область, соответствующая влагонасыщенному топливу (исходное состояние); 2 – область сухой древесины; 3 – газовая область.

В начальный момент времени частица вводится в высокотемпературную среду и нагревается за счет конвекции и излучения. В результате интенсивного нагрева инициируется процесс испарения воды.

Фронт испарения движется от поверхностных слоев топлива в глубинные. В результате формируется пористый древесный каркас с высоким термическим сопротивлением. Водяные пары, образующиеся при испарении, фильтруются сквозь слой сухого топлива, вступая в термохимическое взаимодействие с углеродом.

Прогрев частицы древесины приводит к термическому разложению и выходу летучих. Последние совместно с парами воды и продуктами термохимического взаимодействия углерода и водяных паров фильтруются к поверхности частицы топлива. В результате формируется парогазовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критических значений температур и концентраций горючего.

Необходимо отметить, что при термическом разложении образуется газовая смесь, химический состав которой зависит от множества факторов (породы древесины, степень гнилостного разрушения, влажность).

3.2 Математическая постановка задачи

Математическая постановка задачи воспламенения древесины, соответствующая сформулированной выше физической модели, включает систему нестационарных дифференциальных уравнений.

Область решения задачи (частица в форме сферы) можно условно разделить на две части (рисунок 2). Первая представляет собой исходное еще насыщенное влагой топливо, вторая – сухое дерево. Распределение температуры в такой неоднородной гетерогенной системе описывает уравнение энергии, учитывающее испарение воды, термическое разложение топлива, термохимическое взаимодействие водяных паров и углерода, а также движение водяного пара и продуктов термического разложения сквозь пористый каркас:

$$C_1(T) \cdot \rho_1(T) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} \right] - \frac{Q_{eva} \cdot W_{eva}}{h_d} \cdot \delta(r_{eva}) - \sum_{i=1}^{i=2} Q_i \cdot W_i -$$

$$-C_s \cdot \rho_s \cdot U_s \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} \cdot \theta(r - r_{eva}) \quad (1)$$

$$t > 0, \quad 0 < r < r_{out}.$$

$$\Gamma \text{ где: } \sum_{i=1}^{n=2} Q_i \cdot W_i = Q_{w \rightarrow vol} \cdot W_{w \rightarrow vol} + Q_{C+H_2O} \cdot W_{C+H_2O}$$

$\delta(r_{eva})$ - Функция Дирака. $\theta(r - r_{eva})$ - Функция Хевисайда. При постановке задачи зажигания учитывались условия эксперимента. Теплофизические характеристики (λ , C и ρ) определяются из положения фронта испарения. Массовая скорость испарения ($W_{eva} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right]$) вычислялась из выражения:

$$W_{eva} = W_f \cdot \exp \left(\frac{Q_{wat} \cdot \mu \cdot (T_{wat} - T_f)}{R \cdot T_0 \cdot T_{wat}} \right) \quad (2)$$

Координата границы испарения находилась из выражения:

$$r_F = r_0 - \int_0^{\tau} u_F d\tau \quad (3)$$

где $u_F = W_e / \rho$ – линейная скорость продвижения фронта испарения, м/с.

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

$$C_g \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\lambda_g}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \frac{\partial T_g}{\partial r} \right] + \sum_{i=1}^{i=4} Q_i \cdot W_i$$

$$r_0 < r < r_g \quad (2)$$

$$\Gamma \text{ где: } \sum_{i=1}^{n=4} Q_i \cdot W_i = Q_{CH_4+O_2} \cdot W_{CH_4+O_2} + Q_{CO+O_2} \cdot W_{CO+O_2} + Q_{H_2+O_2} \cdot W_{H_2+O_2} - Q_{N_2+O_2} \cdot W_{N_2+O_2}$$

На границе раздела системы «частица древесины – газовая среда» выполняется граничное условие 4-го рода. При этом учитывается экзотермический эффект реакции углерода с кислородом воздуха:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial r} + Q_{C+O_2} \cdot W_{C+O_2} \quad (4)$$

$$T_1(r_{out}, t) = T_g(r_{out}, t)$$

Скорость реакции $C + O_2 = CO_2 + 18.67$ МДж/кг вычислялась из математического выражения закона Аррениуса:

$$W_i = k_{C+O_2} \cdot c_{O_2}(r_{out}, t) \cdot \rho_g \cdot \exp\left(-\frac{E_{C+O_2}}{R \cdot T_1(r_{out}, t)}\right) \quad (5)$$

Водяные пары совместно с продуктами термического разложения движутся сквозь пористый древесный каркас. Распределение давления по радиусу частицы определялось из уравнения пьезопроводности:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\chi}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) - \frac{1}{m \cdot Z} \cdot \sum_{i=1}^{n=2} f_i \quad (6)$$

$$t > 0, \quad 0 < r < r_{out}, \quad p \geq p_{atm}.$$

$$\sum_{i=1}^{n=2} f_i = W_{w \rightarrow vol} + W_{C+H_2O \rightarrow CO+H_2}$$

Где f_i – функция, определяющая изменение массового расхода парогазовой смеси в результате выхода летучих и поглощения водяных паров при их термохимическом взаимодействии с углеродом. Скорость фильтрации пара определялась из дифференциального выражения закона Дарси:

$$U_s = -\frac{K_p}{\nu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (7)$$

При постановке задачи принято, что водяной пар вступает в эндотермическое химическое взаимодействие с углем. Скорость реакции $C + H_2O = CO + H_2 - 118.485$ МДж/кг вычислялась из следующего выражения:

$$W_{C+H_2O} = k_{C+H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot \rho_s \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{R \cdot T}\right) \quad (8)$$

Разложение топлива с выделением летучих начинается при достижении на поверхности частицы условия $T_{sur} \geq T_{std}$ (T_{sur} – температура

поверхности частицы, T_{std} – температура начала термич). Процесс термического разложения описывается уравнением химической кинетики:

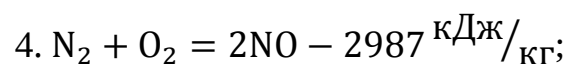
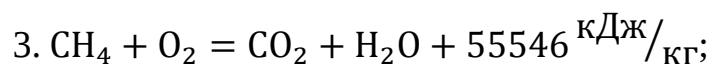
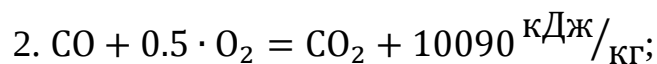
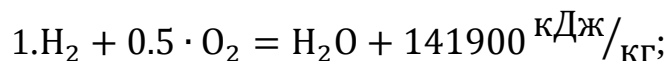
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = [1 - \eta] \cdot k_{w \rightarrow vol} \cdot \exp\left(-\frac{E_{w \rightarrow vol}}{R \cdot T}\right) \quad (9)$$

$$t > 0, \quad 0 < r < r_{out}.$$

Скорость пиролиза рассчитывалась с использованием следующего выражения:

$$W_i = [1 - \eta] \cdot k_{w \rightarrow vol} \cdot \rho_1 \cdot \exp\left(-\frac{E_{w \rightarrow vol}}{R \cdot T}\right) \quad (10)$$

Продукты термической деструкции и химического взаимодействия твердого остатка и водяных паров вдуваются в «пристенную» область. Формируется газовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критических значений температуры и концентрации горючего. Химический состав летучих приведен в таблице 2. 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 следующих реакций:



Скорость этих реакций вычислялась из математического выражения закона Аррениуса:

$$W_i = k_i \cdot c_i \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^n c_i - c_{H_2O} + c_{O_2}\right) \cdot \rho_i \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{R \cdot T_g}\right) \quad (11)$$

Концентрация горючих компонентов (H_2 , CO , N_2 и CH_4) в пристенной области при решении уравнения диффузии для соответствующего компонента реакции:

$$\rho_g \frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{D_i \cdot \rho_g}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \frac{\partial c_i}{\partial r} \right] - W_i \quad (12)$$

$$r_0 < r < r_g$$

Концентрации водяных паров и выделяющихся при термическом разложении диоксида углерода и кислорода определялись аналогично:

$$\rho_g \frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{D_i \cdot \rho_g}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \frac{\partial c_i}{\partial r} \right] \quad (13)$$

$$r_0 < r < r_g$$

Система уравнений (1-13) решалась при следующих краевых условиях и замыкающих соотношениях:

$$0 < r < r_{out}, \quad T(r, 0) = T_0 = 298K, \quad p(r, 0) = p_{atm}, \quad \eta(r, 0) = \eta_0$$

$$r_{out} < r < r_g, \quad T(r, 0) = T_g, \quad c_i(r, 0) = 0,$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (14)$$

$$\left. \frac{\partial^2 T_g}{\partial r^2} \right|_{r=r_g} = 0 \quad (15)$$

$$\left. \frac{\partial p_s}{\partial r} \right|_{r=r_{eva}} = -\frac{\nu}{K_p} u_s(r_{eva}, \theta, t) \quad (16)$$

$$p|_{r=r_{out}} = p_{atm} \quad (17)$$

$$\frac{\partial C_i(r_0, t)}{\partial r} = \frac{W_i \cdot r_0}{\rho_g \cdot D_i} \quad (18)$$

$$\frac{\partial C_2(r_0, t)}{\partial r} = \frac{W_{eva} \cdot r_0}{\rho_g \cdot D_1} \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 C_1(r_g, t)}{\partial r^2} = \frac{\partial^2 C_i(r_g, t)}{\partial r^2} = 0 \quad (20)$$

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

$$\lambda_1 = \varphi_3 \lambda_3 + \varphi_6 \lambda_6 \quad \lambda_2 = \varphi_7 \lambda_7 + \varphi_6 \lambda_6, \quad (21)$$

$$C_1 = \varphi_3 C_3 + \varphi_6 C_6 \quad C_2 = \varphi_7 C_7 + \varphi_6 C_6, \quad (22)$$

$$\rho_1 = \varphi_3 \rho_3 + \varphi_6 \rho_6 \quad \rho_2 = \varphi_7 \rho_7 + \varphi_6 \rho_6, \quad (23)$$

где φ – объемная доля соответствующего компонента топлива: 3 – вода; 6 – дерево; 7 – водяные пары.

3.3 Тестовые задачи

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

Задача 1. Определить температурное поле в стальной пластине ($\lambda=46$ Вт/(м·°C), $\rho=7800$ кг/м³, $c=460$ Дж/(кг·°C)) через 30, 180 и 600 секунд. Толщина пластины $L = 0,5$ м. Начальная температура $T_0 = 50^\circ\text{C}$. На границе $x=0$ и $x=L$ пластина контактирует с внешней средой (коэффициенты теплоотдачи на границах $\kappa_1=1000$ Вт/(м²·K), $\kappa_2=500$ Вт/(м²·K), температуры окружающей среды $T^{e1}=-30^\circ\text{C}$, $T^{e2}=10^\circ\text{C}$).

Левое граничное условие необходимо для определения первых прогонных коэффициентов α_1 и β_1 из выражения $T_1 = \alpha_1 \cdot T_2 + \beta_1$:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \kappa_1 (T^{e1} - T_1).$$

Введем обозначение $\kappa \cdot h / \lambda = Bi$, тогда:

$$T_1 = \frac{1}{1 + Bi_1} \cdot T_2 + \frac{Bi_1}{1 + Bi_1} \cdot T^{e1}$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{1}{1+Bi_1} \\ \beta_1 = \frac{Bi_1}{1+Bi_1} \cdot T^{e1} \end{cases}$$

А правое граничное условие используется для определения температуры T_N :

$$T_N = \frac{\beta_{N-1} + Bi_2 \cdot T^{e2}}{1 + Bi_2 - \alpha_{N-1}}.$$

Результаты численного моделирования приведены на рисунке 3.

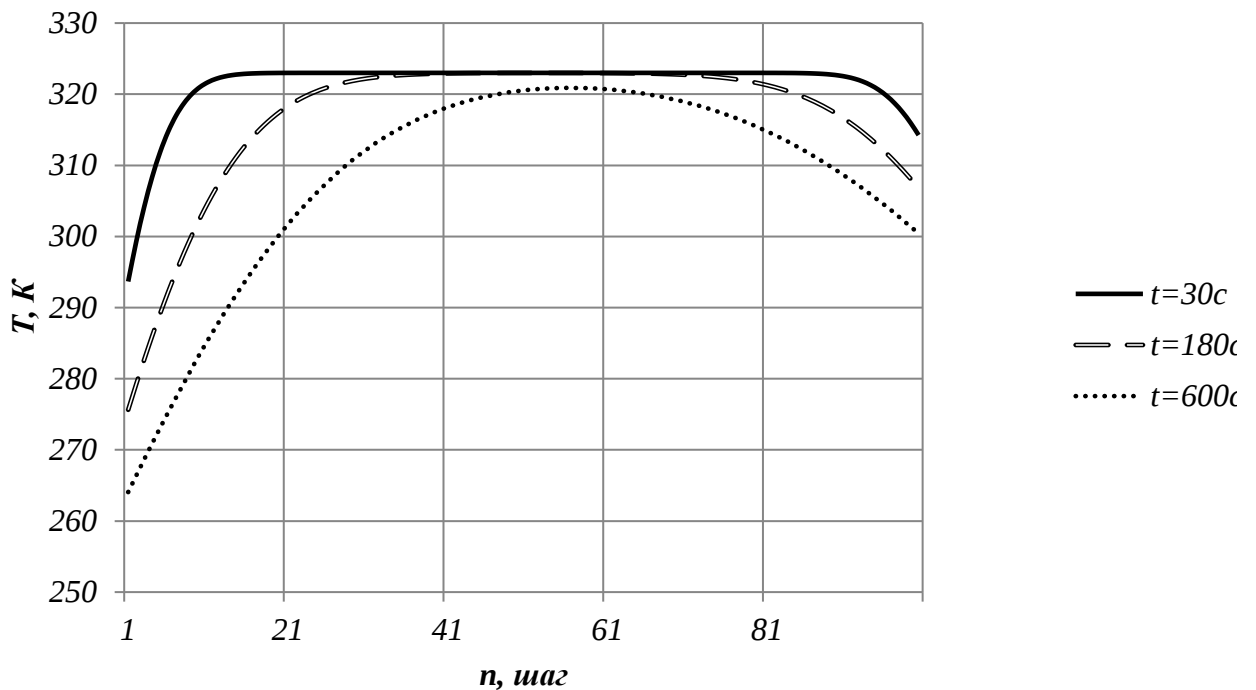


Рисунок 3 - Распределение температуры по толщине стальной пластины за разные промежутки времени (при заданных граничных условиях III рода)

Если задать граничные условия второго рода вместо граничных условий третьего рода (т.е. задать тепловые потоки $q_1=1000$ Вт/м², $q_2=500$ Вт/м²) получим:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_1,$$

тогда:

$$\begin{cases} \alpha_1 = 1 \\ \beta_1 = \frac{h \cdot q_1}{\lambda} \end{cases}$$

Правое граничное условие:

$$T_N = \frac{\lambda \cdot \beta_{N-1} - h \cdot q_2}{\lambda \cdot (1 - \alpha_{N-1})}.$$

Результаты численного моделирования приведены на рисунке 4.

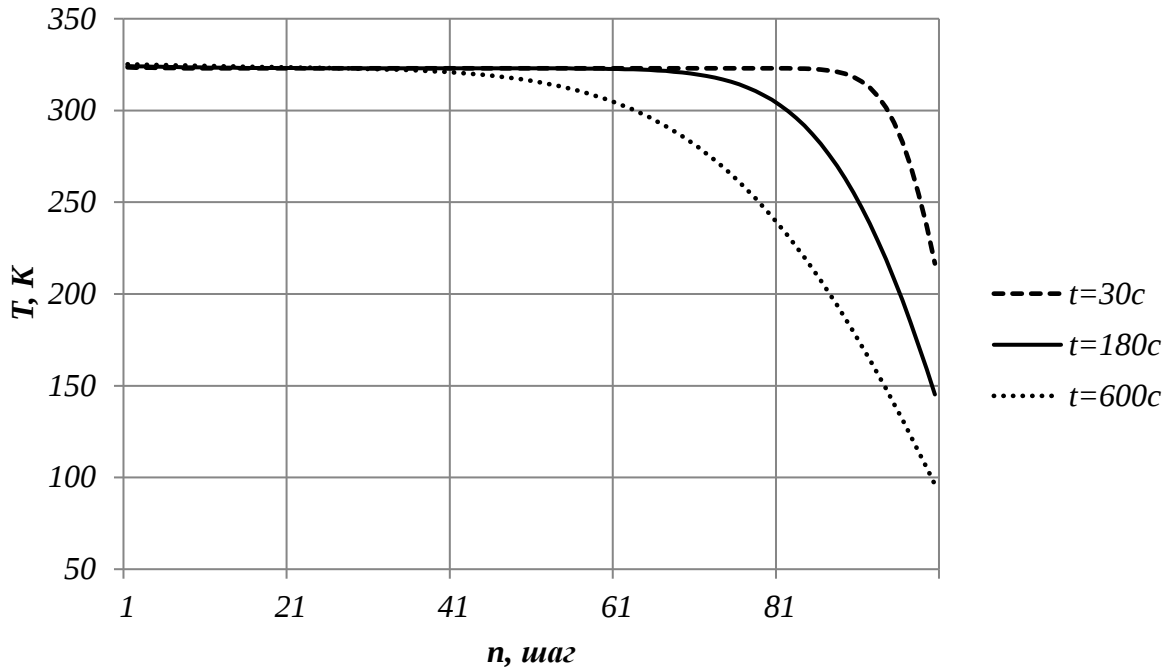


Рисунок 4 - Распределение температуры по толщине стальной пластины за разные промежутки времени (при заданных граничных условиях II рода)

Задача 2. Решить одномерное уравнение теплопроводности с нелинейными граничными условиями третьего рода (излучение на границе). Определить температурное поле в бетонной пластине ($\lambda=0,9$ Вт/(м·°С), $\rho=2000$ кг/м³, $c=920$ Дж/(кг·°С)) через 600, 3600 и 7200 с. Толщина пластинки $L=0,3$ м. Начальная температура $T_0=50^\circ\text{C}$. На границе $x=0$ и $x=L$ пластина контактирует с внешней средой (коэффициенты теплоотдачи на границах $\kappa_1=1000$ Вт/(м²·К), $\kappa_2=500$ Вт/(м²·К), температуры окружающей среды $T^{e1}=30^\circ\text{C}$, $T^{e2}=70^\circ\text{C}$, приведенные степени черноты $\varepsilon_1=0,5$ и $\varepsilon_2=0,2$, постоянная Стефана-Больцмана $\sigma=5,669 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴)). Получаем:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{1}{1 + Bi_1} \\ \beta_1 = \frac{Bi_1}{1 + Bi_1} \cdot T^{e1} + \frac{\varepsilon_1 \sigma h}{\lambda(1 + Bi_1)} ((T^{e1})^4 - (T_1)^4) \end{cases}.$$

Прогоночный коэффициент β_1 нелинейно зависит от температуры на левой границе. Тогда для определения поля температуры необходимо воспользоваться методом простой итерации, основная идея которого, заключается в том, чтобы на каждом временном слое расчет поля температуры вести до тех пор, пока не будет выполняться условие вида:

$$|T_1^{s+1} - T_1^s| \leq \tilde{\varepsilon},$$

где s – номер итерации, а $\tilde{\varepsilon}$ – точность вычислений.

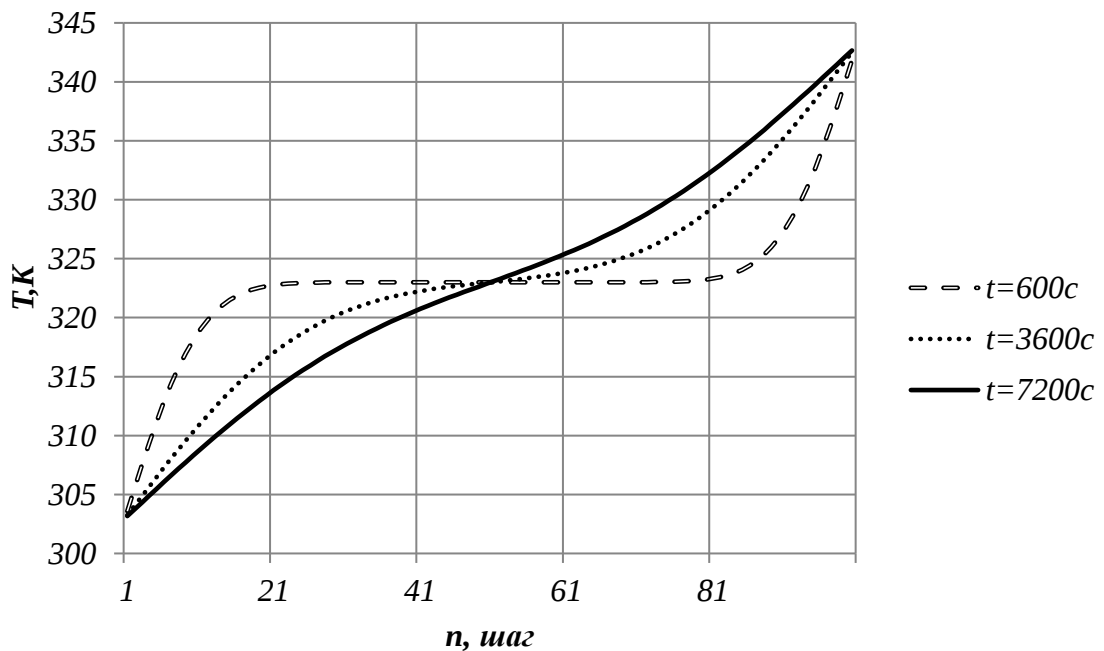


Рисунок 5 - Распределение температуры по толщине бетонной пластины за разные промежутки времени (при излучении на границе)

И правое граничное условие:

$$T_N = \frac{\beta_{N-1} + Bi_2 \cdot T^{e2} + \frac{\varepsilon_1 \sigma h}{\lambda(1 + Bi_1)} ((T^{e1})^4 - (T_1)^4)}{1 + Bi_2 - \alpha_{N-1}}.$$

Результаты численного моделирования приведены на рисунке 5.

Задача 3. Решить одномерное уравнение теплопроводности с фазовым переходом на границе (испарение материала). Определить температурное поле в бетонной пластине при сублимации трифторида алюминия ($\lambda=60$ Вт/(м·°C), $\rho=3070$ кг/м³, $c=1260$ Дж/(кг·°C)) через 50, 180 и 320 с. Толщина пластинки $L=0,3$ м. Начальная температура $T_0=1273$ К. Дополнительные данные: коэффициент аккомодации $A=0,1$, предэкспонент фазового перехода $P_0 = 10^5$, энергия активации процесса $Q_{\text{исп}} = 3,8 \cdot 10^4$ Дж/кг, молекулярный вес $M=0,084$ кг/моль, универсальная газовая постоянная $R=8,31$ Дж/(моль·K).

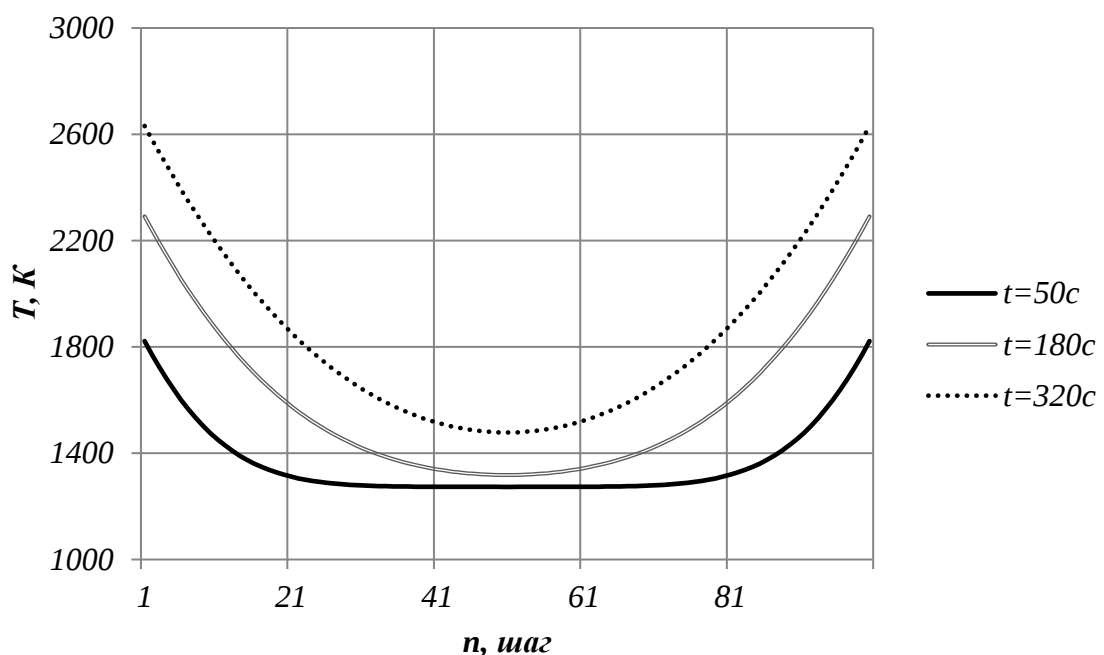


Рисунок 6 - Распределение температуры по толщине бетонной пластины за разные промежутки времени (при испарении материала)

Получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = 1 \\ \beta_1 = \frac{hq}{\lambda} - \frac{A \cdot h \cdot \left(P_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q_{\text{исп}}}{RT_1}\right) - P_{\text{атм}} \right) \cdot Q_{\text{исп}}}{\lambda \sqrt{\frac{2\pi RT_1}{M}}} \end{array} \right.$$

$$T_N = \frac{\lambda \cdot \beta_{N-1} + hq}{\lambda \cdot (1 - \alpha_{N-1})} - \frac{A \cdot h \cdot \left(P_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q_{\text{исп}}}{RT_N}\right) - P_{\text{атм}} \right) \cdot Q_{\text{исп}}}{\lambda \cdot (1 - \alpha_{N-1}) \cdot \sqrt{\frac{2\pi RT_N}{M}}}.$$

Результаты численного моделирования приведены на рисунке 6.

После анализа зависимостей, приведенных на рисунках 3-6, и кривых, полученных после решения аналогичных задач, приведенных в [55], то можно сделать вывод, что полученные распределения температур идентичны.

4 Результаты экспериментального и теоретического исследования процессов зажигания частиц влажной древесины

4.1 Зажигание частиц влажной древесины в среде высокотемпературных газов

Известно, что древесные частицы сжигаются в специальных топочных устройствах. Температуры внутренней среды могут варьироваться в достаточно широком диапазоне (500-2000°C). При этом стоит отметить, что основным и наиболее важным этапом горения древесной частицы является процесс воспламенения. Это обусловлено значительной зависимостью конструктивных параметров топочного устройства от интегральных характеристик процесса зажигания. Соответственно, представляет интерес вопрос изучения процессов воспламенения частиц влажной древесины и выделение времен задержек зажигания в зависимости от параметров внутрикотловой среды.

На рисунке 7 приведены кадры типичной видеогаммы процесса воспламенения древесной частицы цилиндрической формы (диаметром $\delta=3 \cdot 10^{-3}$ м). Температура внешней среды $T_g=1273\text{K}$.

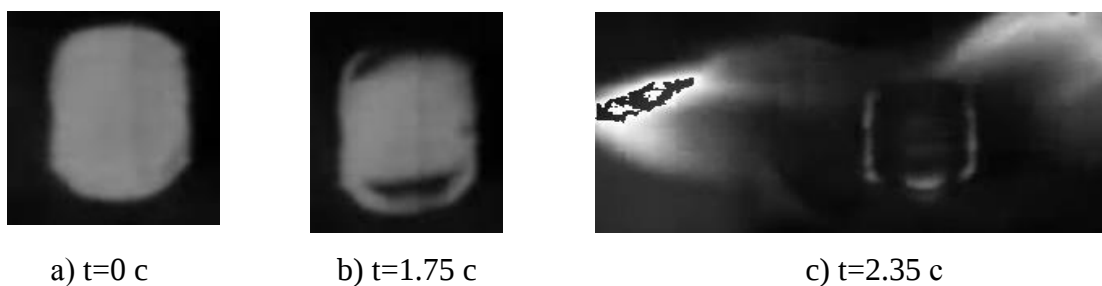


Рисунок 7 – Кадры типичной видеогаммы процессов воспламенения цилиндрической частицы влажной древесины

Общее время от начала нагрева до момента воспламенения $t_i \approx 2,35$ с. Как показывают эксперименты процесс термической подготовки можно условно разделить на ряд последовательных взаимосвязанных стадий (инертный нагрев, испарение воды, термическое разложение органической части топлива, воспламенение летучих, зажигание углерода). В начальный момент времени (кадр а) частица древесины попадает в высокотемпературную среду. Инертный нагрев инициирует испарение воды и термическое разложение (кадр б). Подробный (при большом увеличении) анализ кадра б показывает характерное потемнение поверхности частицы. Через $t=2,35$ с после начала нагрева происходит воспламенение (кадр с) летучих. При этом стоит отметить, что формируется факел горящих летучих, направление оси которого соответствует направлению волокон древесины.

На рисунке 8 приведены экспериментальные и теоретические зависимости времен задержки воспламенения частицы от температуры внешней среды. Анализ результатов экспериментов показывает, что температура внешней среды оказывает существенное влияние на динамику термической подготовки и воспламенения топлива. Так увеличение температуры на 400К (с 873К до 1273К) приводит к ускорению зажигания более чем в 4 раза. Линейный размер частицы также оказывает значительное влияние на характеристики и условия воспламенения.

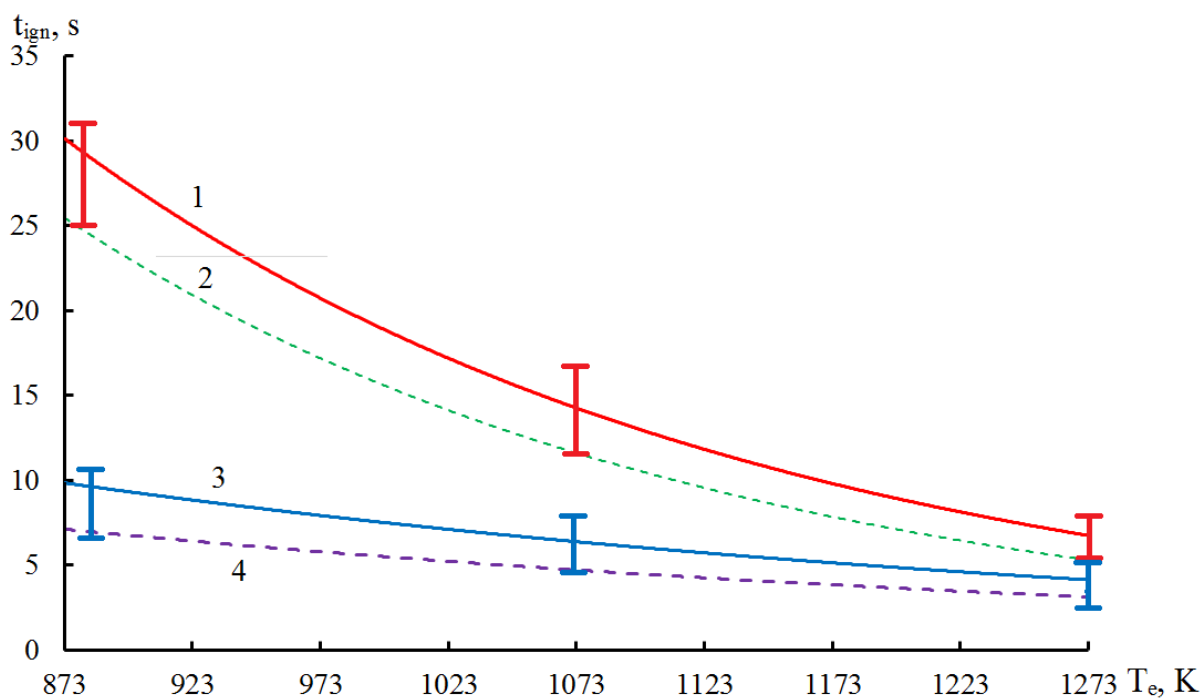


Рисунок 8 - Зависимость времени задержки воспламенения древесной частицы от температуры внешней среды.

1,2 – диаметр частицы $\delta=3,0 \cdot 10^{-3} m$; 3,4 - $\delta=1,5 \cdot 10^{-3} m$;

1,3 – эксперимент; 2,4 – численное решение.

Так изменение диаметра частицы с $\delta=3 \cdot 10^{-3} m$ до $\delta=1,5 \cdot 10^{-3} m$ приводит к ускорению зажигания в 3 раза (с $t_{ign}=30 c$ до $t_{ign}=10 c$). Также необходимо отметить нелинейный (можно сказать экспоненциальный) характер кривых (1)-(4) (рисунок 8). Последнее свидетельствует о существенном влиянии комплекса совместно протекающих в индукционный период процессов термической подготовки (перенос тепла теплопроводностью, испарение влаги, термическое разложение органической части топлива, термохимическое взаимодействие водяных паров и углерода кокса, воспламенение летучих).

Анализ зависимостей (1)-(4) (рисунок 8) показывает, что во всем интервале исследуемых температур отличия теоретических значений t_{ign} от экспериментальных не превышают 14% (другими словами находятся в пределах доверительного интервала). Такое хорошее в целом соответствие теоретических и экспериментальных результатов сохраняется и для частиц

диаметром 1,5 мм.

После верификации математической модели проведено прогностическое моделирование воспламенения древесных частиц в условиях, соответствующих топочному пространству котельных агрегатов. На рисунке 9 приведены зависимости времен задержки воспламенения частиц влажной древесины от температуры внешней среды при различных линейных размерах последних.

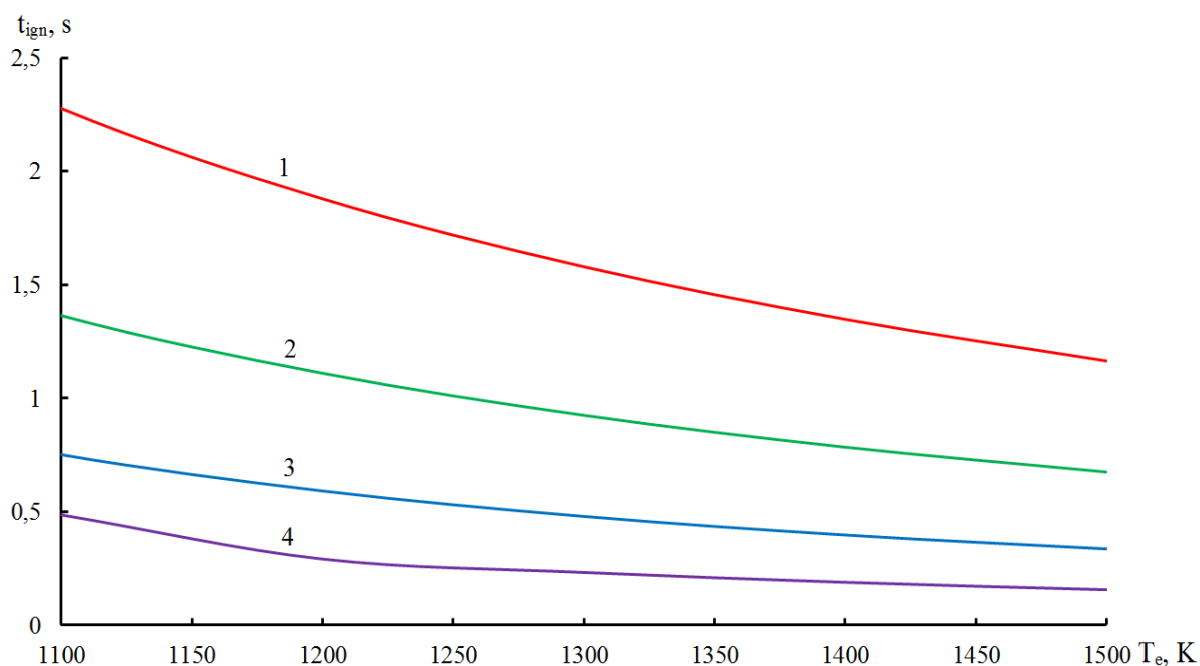


Рисунок 9 - Времена задержки воспламенения влажных ($\varphi=30\%$) частиц древесины в зависимости от температуры внешней среды.

1 - диаметр $\delta=4,0 \cdot 10^{-3}$ м; 2 - $\delta=3,0 \cdot 10^{-3}$ м; 3 - $\delta=2,0 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta=1,0 \cdot 10^{-3}$ м.

4.2 Влияние начальной влажности древесины на характеристики и условия зажигания

Сушка опилок и других древесных отходов является технологически сложным процессом, который имеет высокие энергозатраты. Однако этот процесс оправдан, поскольку при сжигании биотоплива, полученного из

отходов деревообрабатывающей промышленности, выделяется тепловая энергия, стоимость которой значительно превышает затраты на ее получение.

Как известно, древесные отходы поставляются на котельные без предварительной обработки. Следовательно, они имеют неоднородную структуру, так как в них содержится большое количество влаги. Это значительно влияет на характеристики зажигания топлива и существенно замедляет время задержки воспламенения частиц в отличие от сухих.

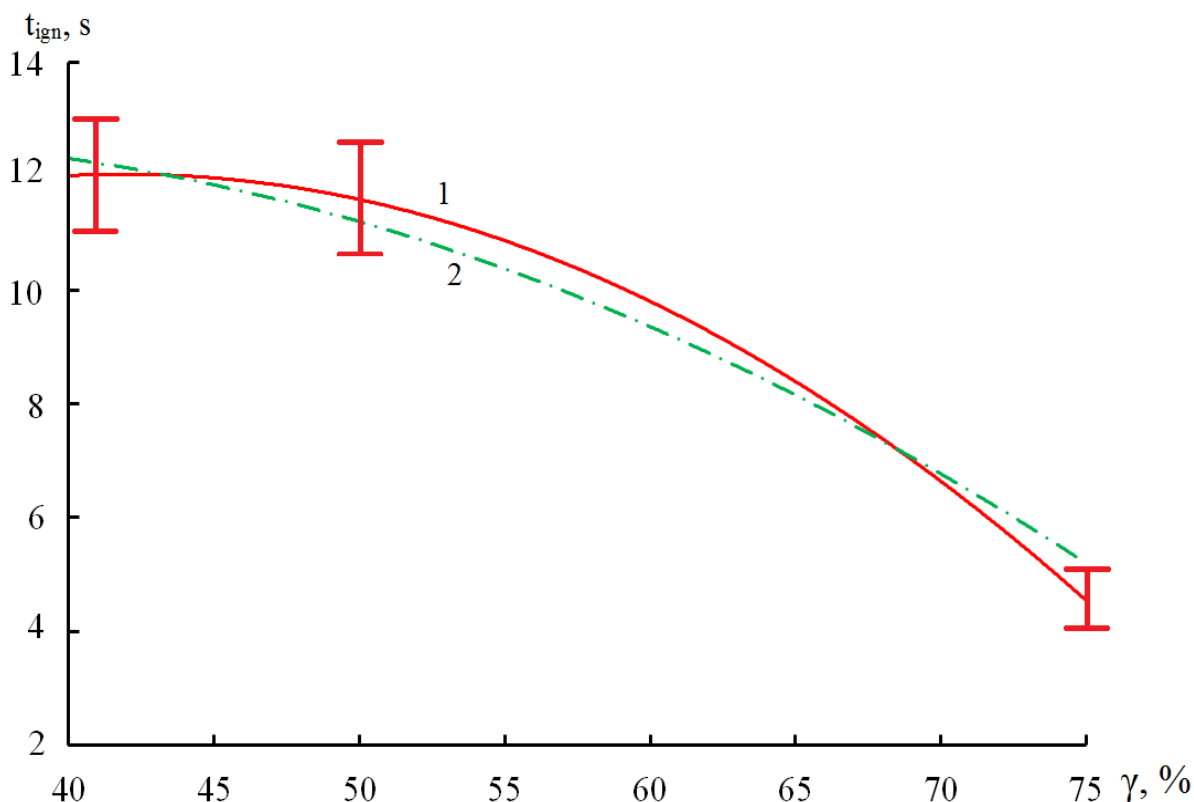


Рисунок 10 - Зависимость времени задержки воспламенения от степени сухости топлива при диаметре частиц $\delta=3 \cdot 10^{-3}$ м и температуре внешней среды $T_g=1300$ К.

1 – эксперимент; 2 – численное решение системы (1)-(17).

На рисунке 10 приведены экспериментальные и теоретические зависимости влияния начального содержания влаги (для удобства восприятия на рисунке приведена доля сухого горючего $\gamma=1-\phi$) частицы древесины на условия и характеристики ее зажигания. В экспериментах исследовались частицы диаметром $\delta=3 \cdot 10^{-3}$ м, при температуре внешней среды $T_g=1073$ К.

Анализ полученных на рисунке 10 зависимостей показывает, что влажность топлива оказывает достаточно существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. Так увеличение φ на 20% (с 40% до 60%) приводит к повышению времени задержки воспламенения на 7 секунд (с 5 до 12 сек.). Последнее свидетельствует о значительном влиянии влажности топлива на условия формирования температурных полей внутри частиц. Также на рисунке 10 приведены рассчитанные численно значения времен задержки воспламенения частиц влажной древесины. Можно заметить, что как уже отмечалось ранее, математическая модель с достаточно высокой степенью достоверности описывает комплекс процессов тепломассопереноса при воспламенении топлива.

4.3 Влияние формы частиц древесины на характеристики и условия зажигания

Следует отметить, что при обработке древесины образуются отходы в виде частиц различной формы, преимущественно цилиндрической и кубической. До настоящего времени влияние формы частицы на характеристики ее зажигания не были изучены, поэтому, эта проблема остается нерешенной до настоящего времени.

На рисунке 11 показана зависимость времени задержки зажигания влажных и сухих древесных частиц кубической и цилиндрической формы размером $\delta=3$ мм от температуры внешней среды.

Анализируя полученные зависимости можно сделать вывод о том, что изменение формы частиц не оказывает существенного влияния на время задержки воспламенения, но при этом необходимо отметить, что режим зажигания частиц зависит от температуры среды. Так, при относительно низких температурах наблюдается зажигание на поверхности частицы, далее, при более высоких температурах – горение в газовой области (выход летучих).

Также следует отметить влияние формы частиц на характеристики зажигания. Частицы кубической формы в режиме твердофазного горения зажигаются быстрее, а при горении в газовой фазе – наоборот, время задержки зажигания цилиндрических частиц меньше. Можно предположить, что правильная форма цилиндрической частицы способствует более равномерному выходу летучих, а острые грани куба выступают в роли "концентраторов" (с них начинается воспламенение).

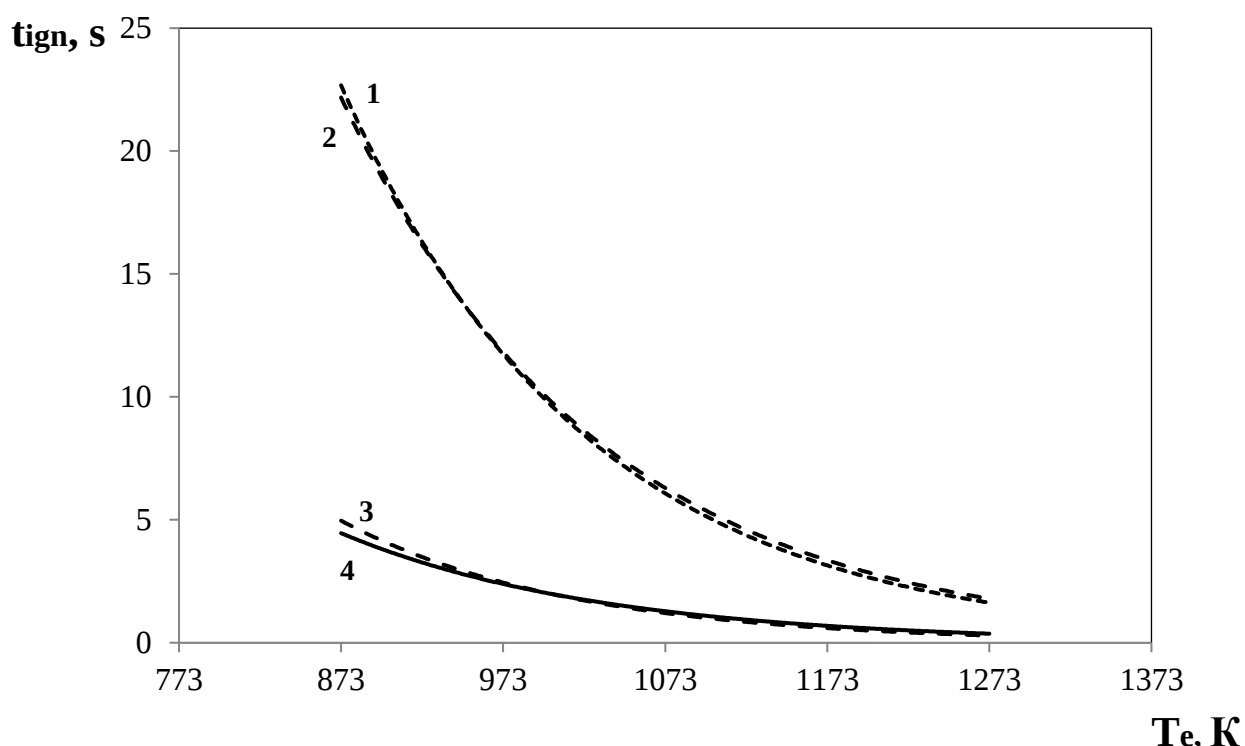


Рисунок 11 - Зависимость времени задержки зажигания влажных и сухих древесных частиц размером $\delta=3$ мм от температуры внешней среды:

1,2 – влажные частицы; 3,4 – сухие частицы;
1,3 – цилиндрической формы; 2,4 – кубической формы.

Стоит обратить внимание, что зажигание влажных частиц происходит значительно медленнее, чем зажигание сухих частиц. Это говорит о том, что немалую часть термической подготовки занимает испарение влаги.

На рисунке 12 показана зависимость времени задержки зажигания влажных древесных частиц кубической и цилиндрической формы от

температуры внешней среды. Исследовались частицы двух размеров – 1 и 3 мм.

В результате анализа зависимостей можно сделать заключение, что для крупных частиц также наблюдаются различные режимы зажигания. Для мелких же частиц характерно лишь зажигание на их поверхности. Предполагается, что после испарения влаги мелкая частица прогревается с очень высокой скоростью, поэтому зажигание происходит еще до выхода летучих.

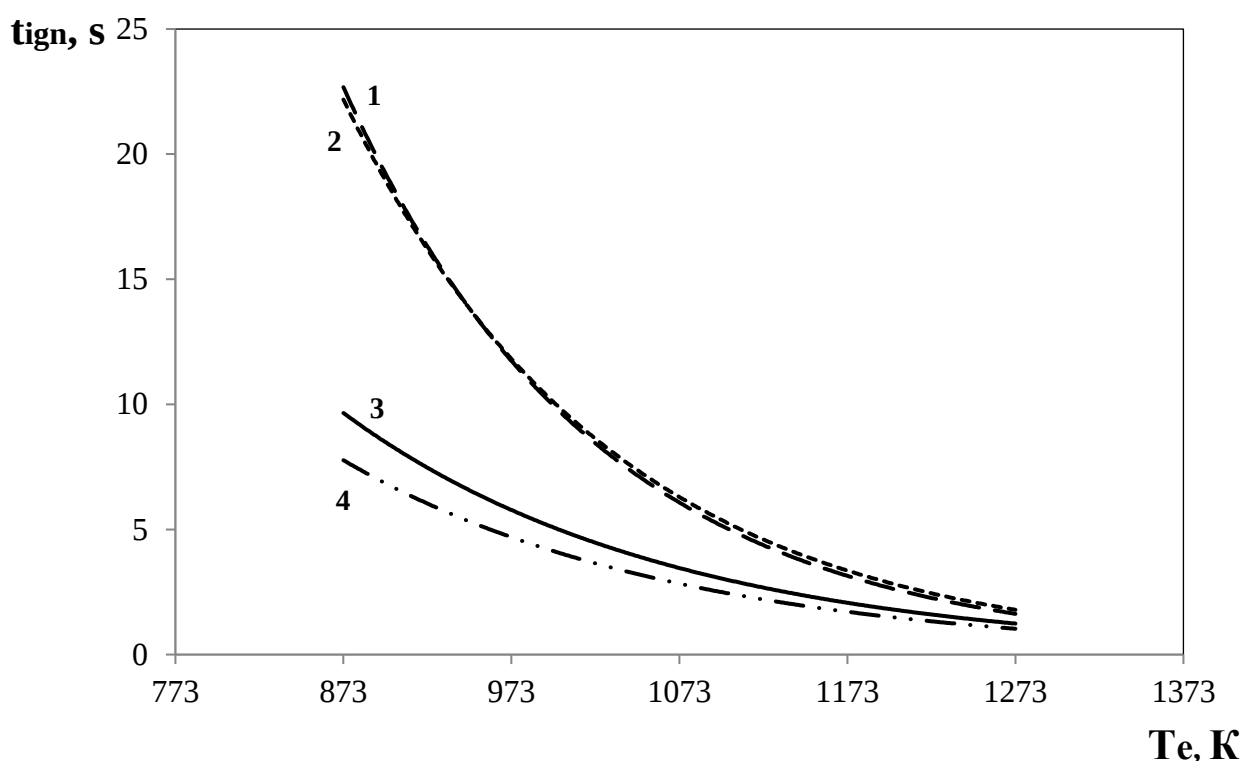


Рисунок 12 - Зависимость времени задержки зажигания влажных древесных частиц от температуры внешней среды:

1,2 – средний размер $\delta=3$ мм; 3,4 – средний размер $\delta=1$ мм;
1,3 – цилиндрической формы; 2,4 – кубической формы.

Аналогично предыдущим зависимостям, следует отметить влияние формы частиц на характеристики зажигания. Частицы кубической формы, как крупные, так и мелкие, в режиме твердофазного горения зажигаются быстрее.

4.4 Рекомендации по конструированию топочных устройств котельных агрегатов, работающих на древесном биотопливе

Полученные в ходе проведенных в работе экспериментальных и теоретических исследований условий и характеристик зажигания частиц влажной древесной биомассы результаты являются основанием для разработки ряда рекомендаций по их практическому применению при разработке технологий сжигания древесного топлива в топочных устройствах котельных агрегатов.

1. Основным результатом является вывод о том, что при повышении температуры среды, в которую попадают частицы древесины, снижается влияние размеров частиц и характеристик топлива в целом на время задержки зажигания. На основании этого можно сказать, что при высоких (более 1000K) температурах дымовых газов при анализе характеристик зажигания частиц древесины могут быть использованы упрощенные подходы и модели, которые не учитывают, к примеру, переход на другой вид топлива, изменение размера частиц и формы. В условиях низких температур (менее 1000K) такие упрощения физической и математической моделей могут привести к большим погрешностям измерения по характеристикам и условиям зажигания (до 200% и более).

Иными словами, при разработке технологий для сжигания древесной биомассы в топках водогрейных котлов уровень математического моделирования должен быть выше (в частности, специфика физических процессов и свойств топлива), чем при проектировании паровых котлов.

В то же время следует отметить, что биотопливо является перспективным направлением не только в «большой», но и в «малой» энергетике. В последнем случае их использование является более простым и технологичным. Поэтому разработанные модели и методы расчета условий и характеристик зажигания древесных частиц могут быть эффективно

использованы для выбора параметров технологий сжигания для таких топлив при разработке котельных агрегатов малой энергетики.

2. Одним из важных итогов результатов проведенных исследований, является вывод о том, что необходимо учитывать радиационный нагрев частиц древесины в течение индукционного периода. Поэтому при оценке времени задержки зажигания этой составляющей теплового потока нельзя пренебрегать. Особенно значительным является вклад радиационного нагрева в топочных устройствах энергетических котлов.

3. Одной из проблем технологий использования древесины в качестве топлива в теплоэнергетике является выбор оптимального (или, по крайней мере, наиболее предпочтительного) размера отдельных частиц на стадии подготовки топлива. Специфика процесса измельчения древесных отходов несет за собой значительное увеличение затрат на энергию для «помола». С другой стороны, наибольшая энергетическая эффективность достигается за счет сжигания мелких частиц (десятки микрон) топлива.

Кроме того, довольно трудно получить очень «мелкие» частицы топлива. Соответственно, проблема выбора характерных размеров частиц древесины является одной из самых важных, но в то же время очень сложной, в связи с влиянием большого количества процессов и параметров на условия и характеристики воспламенения древесного топлива.

Обобщая результаты, полученные в работе над исследованием, для выбора предпочтительных характерных размеров частиц древесного биотоплива можно рекомендовать следующие мероприятия.

При расчете t_{ign} «крупных» ($\delta > 0,5 \cdot 10^{-3}$ м) частиц разумно учитывать влияние всех основных последовательных значимых факторов (зависимость теплофизических свойств характеристик от температуры, индивидуальных свойств древесины, доля влаги, форма частиц). При моделировании процессов воспламенения «мелких» частиц могут быть использованы

существенно упрощенные модели, которые не учитывают большую группу вышеуказанных факторов.

4. Несмотря на важность и эффективность процесса сушки в ходе подготовки топлива, его осуществление является экономически невыгодным. Сушка подразумевает использование высокотемпературных дробилок, сушильного агента (горячего воздуха). К тому же этот процесс существенно повышает категорию пожароопасности зданий тепловых электростанций.

Однако при этом более целесообразно проводить процесс высушивания внутри топочной камеры. Для этого необходимо в камере сгорания котельного агрегата организовать зоны постоянного перемешивания и рециркуляции потока по аналогии с топками, предложенными А.А. Шершневым.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕДИНЕНИЕ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5БЗБ	Бугаева Ксения Андреевна

Институт	ЭНИН	Кафедра	ТПТ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость ресурсов принимается в соответствии с рыночной ценой.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисление в социальные фонды принимаются равными 30 %
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Планирование работ и оценка их выполнения</i>
	<i>Смета затрат на проект</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Смета затрат на оборудование</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Сравнительный анализ полученных результатов</i>
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. <i>График проведения НИР</i>	

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БЗБ	Бугаева Ксения Андреевна		

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данной работы является экспериментальное и теоретическое исследование характеристик зажигания частиц влажной древесины. В данном разделе проведена оценка эффективности замены традиционного топлива на древесное топливо, которое является возобновляемым и более распространенным в природе.

5.1 Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

5.1.1 Планирование работ и оценивание времени их выполнения

В таблице 1 представлены все виды выполняемых работ и время их выполнения.

Таблица 1 – Перечень работ и оценки времени их выполнения

№ п/п	Наименование работ	Количество исполнителей		Продолжительность, дней	
		Инженер (10 р)	Руководитель (13 р)	Инженер (10 р)	Руководитель (13 р)
1	Выдача и получение задания	1	1	1	1
2	Обзор литературы по выбранной теме	1	-	5	-
3	Постановка целей и задач исследования (составление плана работы)	1	1	4	1
4	Закупка оборудования, инструментов, деталей, а также заготовка образцов исследуемого материала	1	1	12	2
5	Установка и подключение оборудования	1	1	5	1
6	Проведение эксперимента	1	-	35	-

Продолжение таблицы 1

7	Обработка экспериментальных результатов	1	-	7	-
8	Составление математической модели, проведение теоретических исследований (с помощью компьютерных расчетов)	1	1	20	3
9	Сравнение результатов, полученных двумя методами (построение необходимых графических зависимостей)	1	-	12	-
10	Оформление пояснительной записки, составление выводов по проделанной работе	1	1	14	1
11	Проверка работы руководителем, выявление ошибок, замечания	-	1	-	1
12	Исправление ошибок	1	-	3	-
13	Утверждение ВКР руководителем	-	1	-	1
	ИТОГО			117	11

По данным таблицы 1 был построен график проведения работ, представленный на рисунке 13.

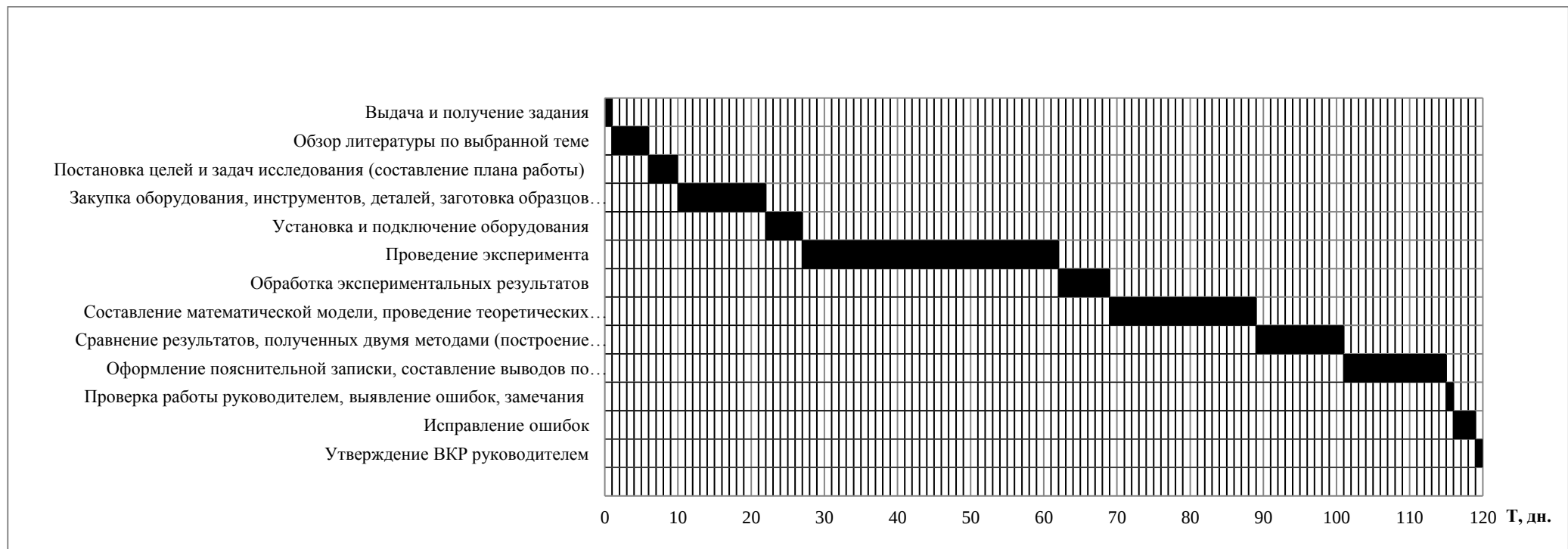


Рисунок 13 – График проведения исследования

5.1.2 Смета затрат на проект

Совокупность затрат на проект определяются по следующей формуле:

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

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

$K_{\text{ам}}$ -амортизация компьютерной техники;

$K_{\text{з/пл}}$ - затраты на заработную плату;

$K_{\text{с.о}}$ - затраты на социальные нужды;

$K_{\text{пр}}$ - прочие затраты;

$K_{\text{накл}}$ - накладные расходы.

Материальные затраты

Под материальными затратами понимается величина денежных средств, потраченных на канцелярские товары, необходимые для проведения работы. Величину этих затрат принимаем $K_{\text{мат}}=1000$ руб.

Амортизация компьютерной техники

Амортизация показывает уменьшение стоимости компьютерной техники, на которой выполнялась работа, вследствие ее износа. Амортизация компьютерной техники рассчитывается как:

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{кт}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}}, \text{ руб./год.}, \quad (2)$$

где $T_{\text{исп.кт}}$ - время использования компьютерной техники;

$T_{\text{кал}}$ - календарное время;

$C_{\text{кт}}$ - цена компьютерной техники;

$T_{\text{сл}}$ - срок службы компьютерной техники.

$$K_{\text{ам}} = \frac{117}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 1602,7 \text{ руб./год.} \quad (3)$$

Затраты на заработную плату

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

$$K_{з/пл} = 3П_{инж}^{\phi} + 3П_{нр}^{\phi}, \text{ руб.}, \quad (4)$$

где $3П_{инж}^{\phi}$ - фактическая заработная плата инженера (инженер – 17000 руб.);

$3П_{нр}^{\phi}$ - заработная плата научного руководителя (ст. преподаватель – 19500 руб.).

Месячный оклад:

$$3П_{инж}^м = 3П_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.}; \quad (5)$$

$$3П_{нр}^м = 3П_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 19500 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 27885 \text{ руб.}, \quad (6)$$

где $3П_{инж}^м$ -месячная заработная плата инженера;

$3П_{нр}^м$ - месячная заработная плата научного руководителя;

$3П_0$ - месячный оклад;

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

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

Фактическая заработная плата:

$$3П_{\phi} = \frac{3П_{мес}}{21} \cdot n^{\phi}, \text{ руб.}, \quad (7)$$

где $3П_{мес}$ - месячная заработная плата;

21- среднее число рабочих дней в месяце;

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

$$3П_{инж}^{\phi} = \frac{24310}{21} \cdot 117 = 135441 \text{ руб.} \quad (8)$$

$$3П_{нр}^{\phi} = \frac{27885}{21} \cdot 11 = 14606 \text{ руб.} \quad (9)$$

$$K_{з/пл} = 135441,4 + 14606,4 = 150047 \text{ руб.} \quad (10)$$

Затраты на социальные нужды

Затраты на социальные нужды принимаются как 30 % от затрат на заработную плату, они включают в себя отчисления в Фонд социального страхования Российской Федерации, Пенсионный фонд Российской Федерации, Государственный фонд занятости населения Российской Федерации и фонды обязательного медицинского страхования.

$$K_{соц/н} = K_{з/пл} \cdot 0,3, \text{ руб.} \quad (11)$$

$$K_{\text{соц/н}} = 150047 \cdot 0,3 = 45014 \text{ руб.} \quad (12)$$

Прочие затраты

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

$$K_{\text{пр}} = (K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з/пл}} + K_{\text{соц/н}}) \cdot 0,1, \text{ руб.} \quad (13)$$

$$K_{\text{пр}} = (1000 + 1602,7 + 150047 + 45014) \cdot 0,1 = 19766,4 \text{ руб.} \quad (14)$$

Накладные расходы

Накладные расходы – дополнительные к основным затратам расходы, необходимые для обеспечения процессов производства, связанные с управлением, обслуживанием, содержанием и эксплуатацией оборудования. Накладные расходы принимаются в размере 200 % от затрат на заработную плату.

$$K_{\text{накл}} = K_{\text{з/пл}} \cdot 2, \text{ руб.} \quad (15)$$

$$K_{\text{накл}} = 150047 \cdot 2 = 300094 \text{ руб.} \quad (16)$$

В таблице 2 представлена смета затрат на проект.

Таблица 2 – Смета затрат на проект

№ п/п	Элементы затрат	Стоимость, руб
1	Материальные затраты	1000
2	Амортизация компьютерной техники	1602,7
3	Затраты на заработную плату	150047
4	Затраты на социальные нужды	45014
5	Прочие затраты	19766,4
6	Накладные расходы	300094
Итого:		517524,1

5.2 Смета затрат на оборудование и монтажные работы

В таблице 3 представлен перечень используемого оборудования в проекте и его стоимость.

Таблица 3 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименование	Стоимость, руб.	Количество, шт.
1	Высокотемпературная печь НОВАТЕРН	80000	1
2	Дополнительные детали	12000	-
3	Координатное устройство	19000	1
4	Объектив Nikon Nikkor AF 80-200mm F/4.5-5.6 D ED VR	74000	1
5	Вытяжная вентиляция	36000	1
6	Компьютер	25000	1
Итого:		246000	

Затраты на монтажные работы, транспортировку и демонтаж оборудования составляют 10 % от суммы затрат на технические средства:

$$I_{\text{монт}} = 0,1 \cdot I_{\text{обор}} \text{ руб.} \quad (17)$$

где $I_{\text{обор}}$ - затраты на оборудование.

$$I_{\text{монт}} = 0,1 \cdot 246000 = 24600 \text{ руб.} \quad (18)$$

Суммарные затраты на оборудование, монтажные работы и транспортировку:

$$I_{\text{итог}} = I_{\text{обор}} + I_{\text{монт}} = 246000 + 24600 = 270600 \text{ руб.} \quad (19)$$

5.3 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

В данном разделе был проведен расчет проекта экспериментального исследования зажигания частиц влажной древесины в высокотемпературной среде:

- составлен перечень работ и произведена оценка времени их выполнения;
- составлена смета затрат на проект;
- составлена смета затрат на оборудование и монтажные работы для реализации проекта.

Несмотря на значительные затраты на реализацию данного проекта, создание экспериментальной базы является рациональной задачей.

Процессы зажигания частиц древесного биотоплива малоизучены и, следовательно, будут являться востребованными при проектировании новых котельных агрегатов на таком топливе и различных исследованиях в области физики горения.

На разработанном экспериментальном стенде можно проводить разнообразные исследования (не только по данной тематике).

Потребителями данного продукта будут являться студенты и преподаватели, проводящие исследования на экспериментальном стенде.