

Школа Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

ООП/ОПОП Технологии сжижения природного газа и промышленная теплотехника

Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА

Тема работы
Зажигание частиц древесной биомассы в условиях комбинированного радиационно-конвективно-микроволнового нагрева

УДК 662.71:662.612.1

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ14	Омаров Азимхан Адилханович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова	Сыродой С.В.	Д.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Якимова Т.Б.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ШБИП ТПУ	Федорчук Ю.М.	Д.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова	Максимов В.И.	К.Т.Н.		

Томск – 2023 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП/ОПОП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен проектировать, методически и консультационно обеспечивать, организовывать и вести учебно-профессиональную, проектную, исследовательскую деятельность обучающихся, в том числе при подготовке выпускной квалификационной работы по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий
ПК(У)-2	Способен осуществлять планирование и научное руководство работ в соответствующей области знаний
ПК(У)-3	Способен осуществлять планирование и контроль работ по безопасной эксплуатации и своевременному ремонту оборудования, основываясь на анализе возможности проведения ремонтных и диагностических работ на технологических объектах с учетом режимов работы объектов
ПК(У)-4	Способен осуществлять проектирование и эксплуатацию теплотехнического, тепломеханического, теплообменного основного и вспомогательного оборудования, а также технологических установок, работающих под избыточным давлением, в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве, в теплоэнергетике, газовой, химической и атомной промышленности
ПК(У)-5	Способен осуществлять анализ режимов работы с формулированием предложений по повышению эффективности деятельности и модернизации предприятий с учетом современных инновационных подходов



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики

Направление подготовки (ООП/ОПОП) 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника (Технологии сжижения природного газа и промышленная теплотехника)

Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП/ОПОП

_____ В.И. Максимов

(Подпись) (Дата) (ФИО)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
5БМ14	Омаров Азимхан Адилханович

Тема работы:

Зажигание частиц древесной биомассы в условиях комбинированного радиационно-конвективно-микроволнового нагрева	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№109-24/с от 19.04.2023

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	31.05.2023
--------------------------------------------	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>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 функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</p>	<p>Объект исследования – процесс зажигания частиц древесного биотоплива, сухая и насыщенная влагой древесина двух видов (сосна и кедр). Требования к продукту – экспериментальное исследование зажигания древесной биомассы в условиях, соответствующих для топочных устройств комбинированного нагрева</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке <i>(аналитический обзор литературных источников 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>	<p>Аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки в рассматриваемой области. Описание экспериментальных стендов. Методика и проведения экспериментов. Обсуждение результатов исследования. О применимости результатов экспериментальных и теоретических исследований в реальной практике</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Якимова Т.Б. доцент ОСГН ШБИП</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Федорчук Ю.М. профессор ООД ШБИП</p>
<p>Раздел ВКР на АЯ</p>	<p>Воробьева В.В. доцент ОИЯ</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</p>	
<p>Объекты и методы исследования; Результаты экспериментального исследования по определению времени задержки зажигания древесного биотоплива</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>14.12.2022</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ</p>	<p>Сыродой С.В.</p>	<p>д.т.н.</p>		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>5БМ14</p>	<p>Омаров Азимхан Адилханович</p>		

Школа Инженерная школа энергетики

Направление подготовки (ООП/ОПОП) 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника (Технологии сжижения природного газа и промышленная теплотехника)

Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

Период выполнения весенний семестр 2022/2023 учебного года

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
5БМ14	Омаров Азимхан Адилханович

Тема работы:

Зажигание частиц древесной биомассы в условиях комбинированного радиационно-конвективно-микроволнового нагрева

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	31.05.2023
--------------------------------------------	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
24.02.2023 г.	Введение. СВЧ-энергетика. Цели и задачи работы.	10
15.03.2023 г.	Современное состояние теории и практики процессов воспламенения и горения топливных частиц в условиях сложного нагрева. Технологии эффективного сжигание биомассы в качестве топлива ТЭС. Применение СВЧ технологий в энергетик, в процессах сушки.	20
20.04.2023 г.	Экспериментальное исследование.	10
05.05.2023 г.	Обсуждение методов и результатов исследования.	50
20.05.2023 г.	Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение». Раздел «Социальная ответственность». Заключение (выводы). Раздел на иностранном языке.	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова	Сыродой С.В.	д.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП/ОПОП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова	Максимов В.И.	к.т.н.		

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ14	Омаров Азимхан Адилханович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 103 страницы, 22 рисунка, 10 таблиц, 76 источник литературы, 1 Приложение.

Ключевые слова: эксперимент, тепломассоперенос, древесное биотопливо, зажигание, СВЧ.

Объектом исследования является процесс зажигание частиц древесного биотоплива, сухая и насыщенная влагой древесина двух видов (сосна и кедр). Относительная влажность древесины, из которой выполнены частицы (с характерным размером 4 мм), варьировалась от 6 (относительно сухая биомасса) до 42 % (влагонасыщенная древесина). в условиях, типичных для топочных устройств, работающих по технологии циркулирующего кипящего слоя, условиях нагрева.

Цель работы – теоретическое и экспериментальное исследование зажигания древесной биомассы в условиях, соответствующих для топочных устройств комбинированного нагрева.

В процессе исследования проводилась оценка влияния микроволновой энергии для ускорения процессов зажигания частиц древесной биомассы при умеренных температурах топочной среды (при $T_g \leq 785$ К).

По результатам исследований получены зависимости времени задержки зажигания, процессов зажигания частицы древесной биомассы в условиях сложного радиационно-конвективно-микроволнового нагрева.

Область применения - результаты теоретического и экспериментального исследования могут стать теоретической базой при проектировании топочных устройств для подготовки и зажигания частиц древесного биотоплива.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	9
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
1.1 Внедрение СВЧ в большую энергетику. Теплофизические основы СВЧ – энергетики	12
1.2 Современное состояние теории и практики процессов воспламенения и горения топливных частиц в условиях сложного нагрева	14
1.3 Разработка технологий эффективного сжигания биомассы в качестве топлива ТЭС	17
1.4 Применение СВЧ технологий в энергетике, в процессах сушки	19
1.5 Распространение технологии СВЧ нагрева в энергетике	28
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	29
2.1 Описание экспериментальных стендов	29
2.2 Экспериментальные образцы	32
2.3 Методика планирования и проведения экспериментов	33
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	35
3.1 Зажигание частиц древесного биотоплива	35
3.2 Времена задержки воспламенения	42
3.3 Теоретическая оценка влияния микроволнового воздействия на температуру частиц древесины	45
3.4 О применимости результатов экспериментальных и теоретических исследований в реальной практике	48
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	51
4.1 Планирование управление научно-техническим проектом	51
4.1.1 Перечень работ и оценка времени их выполнения	51
4.2 Смета затрат	52
4.2.1 Материальные затраты	53
4.2.2 Амортизация компьютерной техники и экспериментального оборудования	53
4.2.3 Затраты на заработную плату	56
4.2.4 Затраты на социальные отчисления	57
4.2.5 Прочие затраты	58
4.2.6 Накладные расходы	58
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	64
5.1 Введение	64
5.2 Производственная безопасность	65
5.3 Вредные факторы	65
5.3.1 Недостаточная освещенность	65
5.3.2 Нарушение микроклимата оптимальные и допустимые параметры	69
5.3.3 Повышенный уровень шума	70
5.3.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ	71
5.4 Анализ опасных производственных факторов	73
5.4.1 Электробезопасность	73
5.4.2 Пожаробезопасность	74
5.5 Экологическая безопасность	78
5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	81
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	82
Приложение А Наименование раздела на иностранном языке	90

Сокращения и обозначения

СВЧ – сверх высокие частоты

МВ – микроволновые волны

ВВЕДЕНИЕ

В Европейском союзе в последние 30 лет происходит переход от традиционных источников энергии, таких как уголь, газ и атомная энергия, к нетрадиционным возобновляемым источникам, таким как ветрогенераторы и солнечные электростанции [1]. Однако, этот переход стал проблемой из-за отсутствия эффективных систем хранения электрической энергии [2,3]. Это ограничивает возможность использования вырабатываемой ветрогенераторами и солнечными электростанциями энергии [4,5]. Отказ от использования угольных и атомных электростанций приводит к значительному снижению экономического роста в Западной Европе. В этой связи древесная биомасса становится перспективным возобновляемым источником энергии. Она может использоваться в качестве топлива как для типичных отходов лесоперерабатывающего комплекса, так и для отходов сельского хозяйства [7,8]. Древесная биомасса может быть использована в качестве энергоносителя в относительно короткий период времени [9]. При сжигании древесной биомассы образуется диоксид углерода, но он не нарушает баланса диоксида углерода в атмосфере [10]. Эксперименты показали [11,12], что при горении древесины образуется значительно меньше оксидов азота и серы по сравнению с горением угля [13-15]. Но к настоящему времени древесная биомасса достаточно мало используется в тепло- и электрогенерации. Последнее связано с тем, что разработка технологии эффективного сжигания биомассы в топках паровых и водогрейных котлов достаточно сложная задача, решение которой в общем виде пока не получено. Так, например, доля котельного оборудования, сжигающего биомассу (в том числе и как добавку к углю), в мире не превышает 10 % [16]. Это обусловлено в первую очередь высокой влагонасыщенностью древесины в ее исходном (после валки дерева) состоянии [17]. При этом известно [17], что сушка любого топлива и древесной самый энергозатратный процесс на тепловых электрических станциях (ТЭС).

Кроме этого, процедуры влагоудаления проводится, как правило, в объемных хранилищах силосного типа [18]. Последнее существенно увеличивает капитальные затраты (на металлоконструкции непосредственно самого бункера и здания бункерного отделения ТЭС) при проектировании и строительстве ТЭС. При этом по результатам экспериментов [19] установлено, что внутрипоровая влага существенно тормозит процесс термической подготовки и зажигания частиц древесины и, соответственно, увеличивает механический недожог топлива. В этих условиях можно сказать, что проведение процедуры влагоудаления приемлемо проводить непосредственно в топочном устройстве при высокотемпературном нагреве потока частиц влажной древесной биомассы. В первую очередь для этого необходимо организовывать в топочном пространстве вихревые зоны постоянной рециркуляции топливного факела по аналогии с топками конструкции Шершнева (рис. 1) [20]. Также следует отметить, что одним из возможных вариантов улучшения характеристик (уменьшение характерных времен процесса) зажигания и горения является сжигание топлива в условиях воздействия на факел топлива физических полей: электромагнитное [21, 22], заряженных частиц [23] или звуковое [24].

Наиболее перспективным из таковых считается (по мнению экспертов [25]) технология сжигания высоковлажного и низкосортного топлива (к которым относится древесная биомасса) в условиях микроволнового воздействия. В результате добавления СВЧ-излучения на слой влагонасыщенного топлива в условиях интенсивного радиационно-конвективного воздействия существенно ускоряется процесс испарения воды. В результате стадия сушки (по терминологии [26]) топливной частицы существенно сокращается, и, соответственно, весь процесс термической подготовки интенсифицируется. Но до настоящего времени систематических экспериментальных и теоретических исследований влияния микроволнового воздействия при воспламенении частицы влажной древесной биомассы практически не проводилось. Поэтому целесообразны исследования с целью сопоставления в условиях такого

воздействия характеристик зажигания частиц сухой и влажной древесины. По этой причине целью работы является установление по результатам экспериментов основных закономерностей процессов зажигания частиц древесной биомассы в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве.

Актуальность

В настоящее время стараются нанести наименьший ущерб экологии. Благодаря этому было решено изучить и провести опыты со сложным комбинированным нагревом частиц древесной биомассы включающую в себя (конвективный, радиационный и нагрев с помощью сверх высоких частот). Основной принцип микроволнового зажигания заключается в том, что микроволны способны проникать сквозь древесные частицы и вызывать их быстрое зажигание при небольших температурах. Этот процесс достигается с помощью микроволновой печи, способной фокусировать микроволны на частицах древесины биомассы. Как только частицы нагреются до определенной температуры, они воспламятся. Наконец, этот процесс намного безопаснее традиционных методов, поскольку при нем не образуется открытого пламени или искр, которые могут вызвать возгорание.

Одним из основных преимуществ в комбинированном нагреве с помощью микроволнового зажигания древесных частиц является то, что оно позволяет снизить выбросы оксида азота в атмосферу, тем самым нанеся наименьший вред экологии, чем традиционные методы сжигания.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Внедрение СВЧ в большую энергетику. Теплофизические основы СВЧ – энергетики.

Процессы теплообмена и связанного с ним массообмена играют важную роль в СВЧ-энергетике, так как они определяют протекание рабочего процесса в технологических установках и генераторах большой СВЧ-мощности, температурный режим узлов и механизмов этих устройств, а также состояние окружающей среды [32].

Микроволновое зажигание частиц древесной биомассы - это процесс, который десятилетиями изучался в области сжигания древесины. Этот метод розжига становится привлекательным, и до сих пор изучается из-за потенциальной повышенной эффективности и более короткого времени розжига. В конце 1990-х годов впервые были проведены эксперименты с микроволновым воспламенением древесных частиц, и с тех пор он стал жизнеспособным методом воспламенения древесных частиц. Он использовался в различных областях применения, таких как камины, печи и дровяные плиты.

Процесс микроволнового зажигания основан на простом принципе нагрева диэлектрика. Это процесс использования электромагнитного поля для нагрева материала. В данном случае материалом являются древесные частицы. При воздействии электромагнитного поля с достаточно высокой частотой частицы поглощают энергию и быстро нагреваются. Это известно как диэлектрический нагрев и является основой для микроволнового воспламенения древесных частиц.

Внедрение СВЧ в большую энергетику является одним из наиболее перспективных направлений развития в современной тепло и электротехники. Уже сейчас совершенно четко выявляются основные преимущества СВЧ-энергетики, к числу которых относится возможность сосредоточения большой

электромагнитной энергии в малых объемах и ее концентрации в нужном месте, что может явиться основой разработки новых энергоэффективных технологий [76]. Достоинством СВЧ-энергетики является и та большая гибкость, с которой СВЧ-энергия трансформируется в другие виды энергии.

Одним из важнейших показателей эффективности использования энергоносителей являются энергозатраты на выработку единицы продукта. К сожалению, по параметру Россия сильно отстает от передовых промышленных стран, и поэтому проблема энергоэффективности – одна из важнейших проблем энергетики. СВЧ-энергетика относится к числу энергоэффективных, и ее широкое внедрение будет способствовать уменьшению энергозатрат на единицу продукта [76].

Действительно, СВЧ-энергетика может играть существенную роль в быту, так и в различных отраслях промышленности, связанных с обработкой пищевых продуктов и пластмасс, сушкой продуктов сельского хозяйства и древесины, затвердеванием и раскалыванием бетона. Широкое внедрение СВЧ – печей и вакуумной сушки в совокупности с СВЧ-нагревом позволит изменить структуру энергораспределения в процессе обработки и хранения пищевых продуктов на базе широко внедрения энергоэффективных СВЧ-технологий [76].

Процесс микроволнового воспламенения древесных частиц включает использование микроволн для быстрого нагрева древесных частиц и их воспламенения. Этот процесс уже много лет используется в промышленности для таких применений, как производство угольных брикетов и древесных гранул для использования в дровяных печах. Главное преимущество микроволнового розжига заключается в том, что он намного быстрее и эффективнее традиционных методов розжига, таких как газовый или электрический нагрев.

В целом, микроволновое воспламенение древесных частиц обладает многими преимуществами по сравнению с традиционными методами сжигания. Этот процесс является высокоэффективным и экономичным, производит меньше выбросов и лучше для окружающей среды.

Вывод о микроволновом воспламенении древесных частиц заключается в том, что этот метод является жизнеспособной альтернативой традиционным методам сжигания древесины. Доказано, что микроволновое зажигание является надежным и эффективным способом воспламенения древесных частиц, и часто это происходит намного быстрее и проще, чем другие методы. Кроме того, благодаря тому, что древесные частицы подвергаются воздействию гораздо более высокой температуры, чем при других методах, сгорание получается более полным и эффективным. Это означает, что топливо сжигается более полно, что приводит к меньшему количеству выбросов и более эффективному использованию топлива.

Наиболее важным преимуществом использования микроволн для воспламенения древесных частиц является фактор безопасности. Традиционные методы сжигания древесины связаны с открытым пламенем и потенциально опасными ситуациями. При микроволновом воспламенении частицы нагреваются и воспламеняются без какого-либо открытого пламени, и риск возгорания исключается. Кроме того, также снижается риск травм, связанных с горением.

1.2 Современное состояние теории и практики процессов воспламенения и горения топливных частиц в условиях сложного нагрева

Процессы зажигания частиц любого топлива при комбинированном тепловом воздействии (одновременно радиационном, конвективном, микроволновом или кондуктивном) на настоящее время изучены достаточно слабо. Это обусловлено множеством объективных причин, связанных со сложностью регистрации тепловых потоков. При этом классическая теория горения, разработанная под руководством Я.Б. Зельдовича, Н.Н. Семенова, Б. Сполдинга, Р. Вильямса и др., не описывает процессы зажигания частиц топлива в условиях сложного радиационно-конвективного и микроволнового нагрева. Поэтому изучение воздействия СВЧ-энергии на характеристики и

условия зажигания и горения органических топлив является чрезвычайно актуальным направлением исследований [56].

Воздействие СВЧ-излучения на топливные частицы приводит к интенсификации всего комплекса процессов термической подготовки, прежде всего - испарения внутрипоровой влаги и термического разложения. При можно обосновано предположить, что такое интенсивное тепловое воздействие будет приводить к интенсивному росту термических (обусловленных градиентом температур) и фильтрационных (вследствие движения водяного пара во внутрипоровой структуре топлива) напряжений. Как показали результаты моделирования процессов зажигания капель водоугольного топлива. Последнее приводит к диспергированию приповерхностного слоя. При этом, как установлено в, такое диспергирование приповерхностного слоя приводит к существенному ускорению процесса зажигания вследствие значительного роста площади тепло- и массообмена между частицей топлива и внешней средой (по аналогии с задачей о «салфетке» Маргулиса).

Перечисленное выше показывает высокую перспективность применения СВЧ-энергии при сжигании низкосортных топлив (таких как влажная древесина или низкосортный уголь). Однако же для обоснования практического использования микроволнового воздействия при зажигании частиц твердых топлив, необходимы теоретические и экспериментальные исследования воздействия СВЧ-поля на топливные частицы в период их термической подготовки к зажиганию. На настоящее время в мировой научной периодике мало публикаций с описанием результатов экспериментальных и теоретических исследований процессов зажигания частиц древесной биомассы в условиях сложного радиационно-конвективно-микроволнового нагрева. Можно отметить лишь несколько работ (например, [52-57]).

В [52] приведены результаты экспериментальных исследований термической обработки с использованием СВЧ энергии биодизеля с целью получения водорода. Проанализировано влияние вида исходного сырья (биодизеля) на характеристики и условия СВЧ-пиролиза, а также на

компонентный состав продуктов термического разложения. Показано, что мощность излучения оказывает существенное и нелинейное влияние на динамику термического разложения. По результатам экспериментов получены дифференциальные зависимости, описывающие термическую подготовку биодизеля. В [53] приведены результаты экспериментальных исследований процессов воспламенения ацетилен-воздушной смеси в камере сгорания в условиях комбинированного электроискрового и микроволнового нагрева. Показано, что применение системы воспламенения с помощью микроволн привело к расширению предела воспламеняемости обводнённой топливной смеси. При этом установлен прирост скорости распространения пламени, который составил до 20 %.

В [54] приведены результаты экспериментальных исследований сжигания угольной пыли в среде СВЧ-плазмы. С целью проведения экспериментов [54] разработано специальное горелочное устройство. Камера горения состояла из двух камер. В первой осуществлялось перемешивание окислителя (воздуха) с угольной пылью. Готовая пылевоздушная смесь подавалась во вторую камеру куда вдувался воздух. Также в вторую камеру горения через серию волноводов подавалось микроволновое излучение. Стенки такой камеры были изготовлены из отражающего радиоволны материала. Последнее вызывает резонанс СВЧ излучения, который приводит к существенной ионизации окислителя.

Аналогичные [55] результаты получены авторами [56, 57] при газификации биомассы в среде водяной плазмы, инициируемой микроволновым воздействием. Показано, что процесс такой газификации обеспечивает полное преобразование биомассы в синтез-газ при использовании максимальной мощности микроволн 6 кВт. При этом особо подчеркивается получение синтез-газа богатого водородом с высокой теплотворной способностью. Предполагаемый процесс может обеспечить эффективный путь устойчивого производства топлива, химикатов и энергии из биомассы.

Проведённый анализ показал, что на настоящее время в мировой научной периодике нет примеров публикаций с описанием результатов процессов

зажигания и горения частиц древесной биомассы в условиях комбинированного радиационно-конвективно-микроволнового нагрева. При этом стоит сказать, что результаты таких экспериментов позволили бы обосновывать использование технологии микроволновой энергии для интенсификации процессов зажигания и горения частиц древесной биомассы [18].

1.3 Разработка технологий эффективного сжигания биомассы в качестве топлива ТЭС

Разработка технологии эффективного сжигания биомассы в топках паровых и водогрейных котлов является достаточно сложной задачей, решение которой в общем виде пока не получено. Так, например, доля котельного оборудования, сжигающего биомассу, в мире не превышает 10 %. Такое состояние дел во многом обусловлено тем, что любая биомасса (в том числе наиболее привлекательная для теплоэнергетики – древесина) в своем обычном состоянии является влагонасыщенной. Предварительное же удаление влаги, например, из измельченной древесины достаточно энергоемкий процесс [18]. Кроме того, проведение процедуры влагоудаления проводится, как правило, в объёмных хранилищах силосного типа. Последнее существенно увеличивает капитальные затраты (на металлоконструкции непосредственно самого бункера и здания бункерного отделения ТЭС) при проектировании и строительстве ТЭС. Также избыточная влага (характерная для естественного состояния биомассы) существенно замедляет процесс зажигания частиц биомассы (по данным) и, соответственно, увеличивает механический недожог топлива. В то же время по результатам теоретических [40, 41] и экспериментальных [42] исследований показано, что водяные пары могут выступать в роли адсорбирующего оксида серы и азота агента, трансформируя последний в пары серной и азотной кислот. Надо сказать, что на таком же принципе основан метод Эбара [43] секвестирования антропогенных оксидов в продуктах горения.

В этих условиях проведение процедуры влагоудаления из частиц древесины приемлемо проводить непосредственно в топочном устройстве. В первую очередь для этого необходимо организовывать в топочном пространстве вихревые зоны топливного факела с постоянной рециркуляцией газов и частиц по аналогии с топками конструкции Шершнева (рисунок 1 [44]).

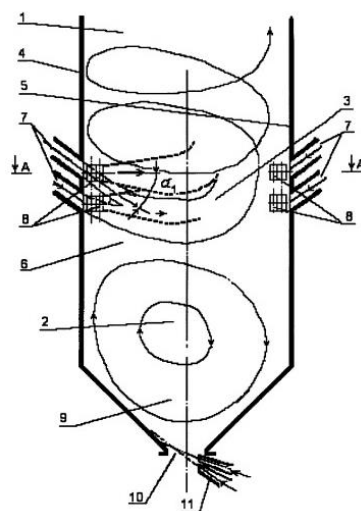


Рисунок 1 - Топочное устройство конструкции Шершнева [44]

Также одним из возможных вариантов улучшения характеристик топочных процессов (уменьшение характерных времён процессов зажигания и горения) является (по мнению авторов [45, 46]) сжигание высоковлажного и низкосортного топлива (к которым относится древесная биомасса) в условиях микроволнового воздействия. В результате воздействия СВЧ излучения на слой влагонасыщенного топлива в дополнении к интенсивному радиационно-конвективному нагреву существенно ускоряется процесс испарения воды [47]. В результате время стадии сушки (по терминологии [48]) топливной частицы существенно уменьшается и, соответственно, весь процесс термической подготовки интенсифицируется [49]. Особенности сжигания в циркулирующем кипящем слое. Система сжигания с циркулирующим кипящим слоем позволяет частицам топлива псевдоожигать воздух для горения. Эта система сжигания характеризуется быстрым псевдоожиганием и установкой воздуховода на выходе дымовых газов для сбора частиц. Данная система сжигания имеет

следующие преимущества по сравнению с другими системами сжигания [33]. Время сгорания сравнительно велико для сжигания по всей площади, а также для рециркуляции. Эта особенность повышает эффективность сжигания и делает эту систему применимой для широкого спектра видов топлива, а также для а также для сжигания смесей. Кроме того, частицы, циркулирующие в топке, сохраняют достаточно тепла, чтобы высушить даже топливо с высоким содержанием влаги. Таким образом, такое топливо может быть использовано без предварительной сушки [34]. Подача известняка в топку обеспечивает сероочистку. Также многоступенчатый впрыск воздуха, наряду с более низкой температурой сгорания от 850°C до 950°C, обеспечивает низкий уровень выбросов NOx. (2) Сжигание с малым расходом воздуха

Поскольку применяется высокоскоростной псевдоожижающий поток, относительная скорость частиц и скорость молекул воздуха будет велика и способствует реакции газ-твердое тело. Это позволяет установить коэффициент избытка воздуха на низком уровне (2). Высокая экономичность оборудования. Поскольку воздействие этой системы на окружающую среду невелико, не требуется не требуется специальная установка для очистки выхлопных газов. Это приводит к более простой конфигурации установок, что, в свою очередь, снижает первоначальные инвестиции. Этот эффект особенно заметен на электростанциях среднего размера. Эти преимущества системы способствуют решению проблем, уникальных для производства электроэнергии из биомассы. Но на настоящее время систематических экспериментальных и теоретических исследований с целью оценки влияния микроволнового воздействия при воспламенении частицы древесной биомассы на время задержки зажигания практически не проводилось.

1.4 Применение СВЧ технологий в энергетике, в процессах сушки

Уникальные характеристики микроволн обуславливают потенциальные преимущества этой технологии сушки [35]. Во-первых, поскольку микроволны

могут проникать в материалы и передавать энергию напрямую, тепло может генерироваться по всему объему материала и обычно начинается изнутри. Это можно добиться быстрого нагрева для многих материалов. Во-вторых, в дополнение к объемному нагреву, микроволны можно использовать для селективного нагрева. Когда различные фазы в материале имеют различные диэлектрические свойства, микроволны будут избирательно соединяться с материалами с высокими потерями [36]. Поскольку вода во влажных материалах обычно имеет относительно высокий коэффициент диэлектрических потерь по сравнению с другими компонентами, микроволновая сушка может быть саморегулирующейся по своей природе. Это приводит к явлению автоматического выравнивания влажности и, в конечном счете, к эффективной сушке. В-третьих, микроволновая энергия потребляется только тогда, когда это необходимо, и мгновенно становится доступной что делает процесс наиболее подходящим для автоматического управления.

Распределение температуры в образце также является особым для микроволновой сушки. Уголь неоднороден, и различные материалы в матрице угля имеют различной проницаемостью, и поэтому их реакция на микроволновое излучение является разная [37]. Некоторые материалы в угольной матрице являются хорошими поглотителями микроволн и достигают более высоких температур за короткое время, в то время как некоторые материалы почти прозрачны для микроволнового излучения. Тем не менее, должна существовать некоторая теплопередача между этими материалами. Поэтому микроволновую сушку можно рассматривать как гибридный процесс, так как он фактически включает в себя обычную теплопроводность и конвекция. Даже для чистых материалов внутренняя температура может быть выше, чем температура поверхности при микроволновом нагреве, что приводит к инвертированному градиенту температуры. Таким образом, при микроволновой сушке температура изменяется по всему образцу [38].

Хотя прямой нагрев микроволнами может дать много преимуществ по сравнению с традиционной теплопередачей, иной механизм передачи энергии

при микроволновом нагреве также привел к возникновению нескольких новых проблем, связанных с обработкой [39]. Во-первых, неравномерное высыхание становится отличительной особенностью микроволновой сушки, что может быть связано с обратными механизмами генерации тепла и возможными флуктуации приложенного электромагнитного поля, вызванные неизбежными внешними факторами. Во-вторых, когда материалы находятся под микроволновым излучением, они часто подвергаются физическим и структурным преобразованиям, которые влияют на их диэлектрические свойства. Таким образом, способность микроволн генерировать тепло изменяется в течение процесса [40]. Резкие преобразования приводят к значительному изменению диэлектрических свойств и вызывают трудности при моделировании и управлении микроволновой сушкой.

Технологии производства и обработки материалов, которые на многие годы отстали от модернизации, что часто приводит к неэффективным и экологически небезопасным методам [41]. Такая ситуация сложилась из-за отсутствия исследований и разработок. Используемые сегодня методы производства являются крайне вредными для окружающей среды и здоровья людей, работающих на производстве и рядом с ним. Однако, поскольку требования к технологии производства с каждым годом становятся все более жесткими, наука вынуждена проводить исследования и разрабатывать современные, энергоэффективные и экологически чистые методы производства. Микроволновая технология показала хорошие результаты в этом отношении. Примером может служить разработка энергоэффективных микроволновых рабочих камер для термообработки керамики.

Использование микроволновой энергии может улучшить термообработку керамики, обеспечить структурную однородность продукта и повысить производительность и энергоэффективность [42]. Прочность образцов, спеченных при температуре 700 С с использованием СВЧ, увеличилась в 2,5 раза.

Электромагнитные волны, распространяющиеся через различные среды, подвержены тем же эффектам отражения, преломления, рассеяния и поглощения, что и другие излучения. Какое из этих действий играет доминирующую роль, зависит в основном от физических свойств материала. [43].

Таким образом, степень поглощения электромагнитной энергии определяется молекулярной структурой, геометрией, температурой материала и частотой электромагнитного поля. Многочисленные применения микроволновой энергии основаны на свойстве молекул воды интенсивно поглощать микроволны и особенно актуальны для процесса сушки различных материалов, таких как уголь, древесина и керамика [71]. Физические свойства поглощения электромагнитной энергии следующие. Молекулы всех материалов связаны между собой силами межмолекулярного взаимодействия. Когда переменное электромагнитное поле действует на материал, заряды внутри молекул начинают двигаться. Движение заряженных частиц требует работы для противодействия силам межмолекулярного взаимодействия, которые играют роль внутреннего трения, и эта работа преобразуется в тепло. Это явление известно как «диэлектрический нагрев». Эффективность преобразования энергии переменного электромагнитного поля в тепло пропорциональна квадрату коэффициента диссипации (коэффициент поглощения энергии), частоты и напряженности поля в материале [72]. Мощность поглощаемая материалом, пропорциональна частоте излучения, что определяется способностью высокочастотных электромагнитных волн передавать микроволновую энергию с большей эффективностью при более низких напряженностях поля. Наиболее важным преимуществом МВ-облучения является то, что электромагнитное поле проникает в материал на значительную глубину, создавая объемное распределение источников тепла и устраняя необходимость в теплоносителе. Это объясняется тем, что для МВ-облучения не требуется источник тепла. Обычные методы нагрева, с другой стороны, сопряжены с риском перегрева поверхности нагреваемого материала до того,

как нижележащий слой достигнет соответствующей [31]. Микроволновое облучение свободно контролируется и практически не обладает инерцией, что позволяет выделять тепло мгновенно. Одним из важнейших преимуществ микроволнового облучения является также его избирательный характер, при котором отдельные компоненты многокомпонентного материала нагреваются по-разному в соответствии с их коэффициентом поглощения. Это свойство широко используется при микроволновой сушке материалов, при которой из материала испаряется вода, а сам материал сохраняет свои свойства [72]. В пористых материалах в процессе сушки СВ влага непрерывно с поверхности и образовавшийся перемещается из внутренних слоев к поверхности материала, испаряется с поверхности, а образовавшийся пар диффундирует в окружающую среду. В сложных, неоднородных пористых материалах имеет место испарение влаги происходит во внутренних слоях, а влага внутри материала движется в конденсированном и парообразном состоянии. Использование микроволн часто может сделать процесс сушки более экономичным. При общей энергоэффективности до 85% микроволновые установки значительно снижают потребление энергии, поскольку не используется промежуточный теплоноситель [73].

Большинство доступных диэлектриков являются поляризованными. Существует два типа поляризации: быстрая и медленная. Быстрая поляризация – это электронная поляризация ($\sim 10-15$ с, соответствует собственной частоте атомов и молекул), из-за смещения электронных оболочек относительно ядра, в результате чего возникают дипольные моменты, и поляризация смещения ионов ($\sim 10-12$ с, что соответствует собственной частоте колебаний ионов), из-за смещения упруго - связанных ионов на расстояние меньше постоянной кристаллической решетки [44]. Медленная поляризация включает дипольную (ориентационную), структурную и ионную релаксацию. Дипольная поляризация характерна для полярных молекул, которые имеют постоянный дипольный момент в отсутствие внешнего поля. При действии внешнего поля происходит ориентация диполя, а вращение диполя сопровождается потерей энергии в виде

тепла. Поляризационная ориентация полярных молекул постепенно увеличивается ациклическим образом с постоянной времени порядка $10^7 - 10^{13}$ с (время релаксации) [45]. Структурная поляризация, характерная для твёрдых тел с неоднородной структурой и примесями, является дополнительным механизмом релаксационной поляризации. Под действием внешнего электрического поля электроны перемещаются внутри структурных включений, создавая дипольные моменты. Такие тела включения ведут себя как гигантские поляризованные молекулы, время релаксации которых следующее $10^3 - 10^8$ с [46]. Данный вид поляризации характерен для адсорбирующих материалов, каким является уголь.

Интенсивность нагрева влажного материала во время воздействия МВ настолько высока, что скорость испарения внутри пористого тела многократно превышает скорость переноса паров. Когда температура материала превышает 60 С внутри тела возникает общий градиент давления, который является основной движущей силой для переноса паров внутри тела [47]. Этому явлению способствует процесс диффузии в микрокапилляре и струйный поток воздуха в микрокапилляре, так как температура внутри материала выше, чем на его поверхности. При сушке МВ термическая диффузия влаги в материале происходит от центра к поверхности, поэтому содержания влаги на поверхности выше чем в центре. Поэтому перенос влаги от центра поверхности затрудняется концентрационной диффузией от поверхности к объёму [47].

Кинетика процесса сушки влажных материалов определяется механизмом влаготеплопереноса, при сушке МВ большой градиент влажности оказывает механическое напряжение на тело, увеличивая риск внутреннего растрескивания. Нагревая поверхность материала и изменяя градиент температуры, можно равномерно распределить содержание влаги внутри материала. Таким образом, комбинирование этих методов позволяет повысить эффективность технологии сушки и снизить потребление энергии в несколько раз по сравнению с обычной сушкой. [74]. Кинетика сушки МВ схожа с другими методами сушки. В начале процесса материал быстро нагревается, и скорость

сушки увеличивается. Затем следует период постоянной скорости, в течение которого температура тела и скорость испарения остаются постоянными. Температура тела в этот период зависит от электротермофизических свойств материала и режимных параметров ($v, E, tg\delta, \varepsilon$) процесса. Очень часто процесс сушки МВ в течение первого периода при температуре материала, близкой к 100°C . После окончания периода постоянной скорости сушки интенсивность испарения снижается, а температура материала повышается. Такая организация процесса сушки значительно повышает прочность сушки [75].

В статье [48] выполнен анализ сушки бурых углей Мунгунского и Березовского месторождений в России при микроволновом облучении показала, что нагрев этих углей проходит с одинаково высокой скоростью, соответствующей $\sim 50^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Конечная температура сушки этих углей с различным элементным и литологическим составом одинакова и составляет $\sim 95^{\circ}\text{C}$. Было показано, что метод сушки, сочетающий микроволновое и конвективное дутье, позволяет интенсивно удалять воду на заключительной стадии и значительно сократить время воздействия микроволновой энергии на бурый уголь примерно в шесть раз.

Исследования [49] также показали, что при испарении влаги происходит полное удаление азота из образцов угля и снижение серы этих углей. Последнее положительно сказывается на уменьшении выхода токсичных продуктов горения.

В последние годы австралийские ученые занимаются исследованиями воздействия микроволновой энергии на каменный уголь для сушки с улучшением его качества [50].

В теории сушки выделяют следующие виды:

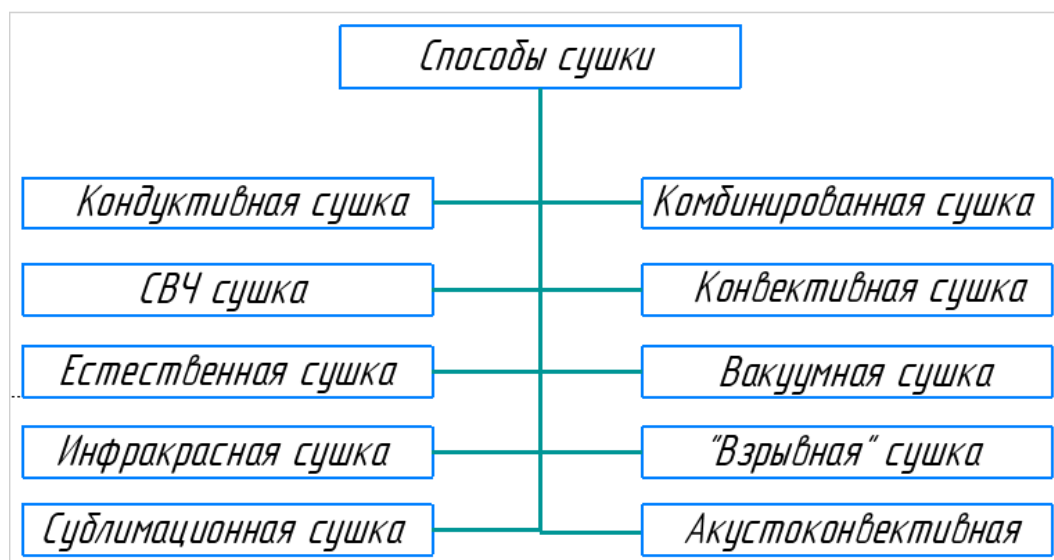


Рисунок 2 - Способы сушки

Из 11 методов сушки наиболее перспективными были признаны инфракрасная и микроволновая сушка. Энергозатраты на испарение при традиционных методах сушки составляет $1,8 \div 3,0 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{кг}$. При СВЧ-сушке потребность энергии для испарения снижается до $1,6 \div 1,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{кг}$. Аналогичное сокращение наблюдается и во времени, необходимом для СВЧ-сушки. Для сублимационной, конвективной и естественной видах сушки время сушки составляет $8 \div 20 \text{ ч}$ [16,34]. При микроволновой сушке время высушиваемого материала снижается до 4 ч [51].

Микроволновая обработка угля были проведены значительные исследования влияния микроволнового излучения на уголь. Применение микроволн в этой области может быть классифицировано на три основные области: исследования скорости нагрева/сушки, десульфуризация и исследования размолоспособности. Эксперименты с микроволновым излучением проводились с использованием коммерческой печи мощностью 800 Вт, 2,45 ГГц [52]. Каждый образец вынимался из микроволновой печи для взвешивания и затем быстро помещался в камеру. Термогравиметрический анализ (ТГА) были получены результаты в виде процентной потери веса в зависимости от времени обработки. Получены [53]. Сравнительные результаты

ТГА ясно показали значительное преимущество микроволновой сушки в плане сокращения времени сушки почти в десять раз. Стендовая установка с угольной суспензией, подаваемой на конвейерную ленту, продемонстрировала, что эту технологию можно использовать в промышленных масштабах. возможность применения этой технологии в промышленности. Производство пылеугольного топлива для угольных электростанций является очень энергоемкий процесс. Улучшение размалываемости означает снижение энергозатрат на измельчения угля. В связи с потенциальными выгодами, в этой области были проведены значительные исследования. Было показано, что предварительная обработка угля с помощью микроволновым излучением улучшает размалываемость угля. [54] продемонстрировали, что индекс работы связки может быть снижен на 30% при коротком воздействии угля микроволновым источником мощностью 650 Вт и частотой 2,45 ГГц. Снижение относительного индекса работы Бонда было объяснено растрескиванием, инициированным вокруг зерен пирита и давления, возникающего при перегреве воды в пористой структуре угля. [55] сообщили, что микроволновое излучение оказывает такое же влияние на теплотворную способность угля, как и обычный тепловой нагрев. Угли более низкого класса такие как торф или бурый уголь, более чувствительны к микроволновому излучению из-за их более высокого содержания влаги. Примерно 50%-ное снижение индекса работы связки было достигнуто после обработки микроволновым излучением. Они предполагают, что газообразное эволюция (вода и летучие вещества), а также разрастание минералов габитуса являются возможными причинами улучшения размалываемости угля и что степень этого зависит от конкретных свойств угля. [56] подвергли уголь воздействию микроволнового излучения при мощности 8,5 кВт в течение очень короткого времени пребывания (0,1 секунды), чтобы не повредить структуру угля чтобы не повредить структуру угля или не вызвать возгорание. Результаты показали, что микроволновое излучение приводит к физическим изменениям, таким как трещины и разломы, даже при коротком времени обработки времени.

1.5 Распространение технологии СВЧ нагрева в энергетике

В Иркутском государственном техническом университете предложили использовать сушку бурогоугольного концентрата с помощью микроволнового излучения. В ходе теоретических и практических исследований был выявлен ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционным конвективным методом обработки угольных образцов различных месторождений, таких как сокращение времени обработки и взрывобезопасность, снижение содержания азота и серы в угле, уменьшение расхода энергии и металлического оборудования [57].

Проведённый выше анализ известных результатов экспериментальных и теоретических исследований показал, что микроволновое воздействие на топливные частицы в процессе сгорания топлива позволяет существенно улучшить динамику воспламенения и горения (например, результаты, приведенные в [58]). Но широкого распространения технология СВЧ-нагрева топлива при зажигании последнего в энергетике не получила. Это, скорее всего, связано с тем, что на настоящее время не разработано теоретических основ необходимых для обоснования применения микроволновой энергии при зажигании частиц твердых топлив в той или иной технологии топливосжигания: пылевидное сжигание, кипящий слой, циркулирующий кипящий слой и т.д. При этом особенности нагрева топливных частиц в каждой из этих технологий существенно отличаются. Соответственно, оптимальный выбор характеристик (частота излучения, мощность волны, напряжённость электромагнитного поля и т.д. [58]) микроволнового нагрева топливных частиц является актуальной и нерешенной до настоящего времени задачей современной теплотехники. Для решения последней необходимы знания о характеристиках зажигания топливных частиц (например, древесной биомассы) в условиях нагрева, соответствующих различным технологиям топливосжигания: пылевидное факельное сжигание (преимущественно радиационный нагрев), кипящий и циркулирующий слой (радиационно-конвективный).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Описание экспериментальных стендов

Для оценки влияния условий нагрева и характеристик воспламенения проведены экспериментальные исследования на трех существенно отличающихся (по условиям нагрева) экспериментальных стендах.

Первая группа экспериментов проведена на экспериментальном стенде, представленном на рисунке 3, который по принципу формирования условий нагрева, методам регистрации процессов зажигания и обработки результатов эксперимента. Стенд, приведенный на рисунке 2, воспроизводит процессы тепло и массопереноса, протекающие при зажигании топливных частиц в условиях преимущественно радиационного нагрева. Основной частью экспериментального стенда является полый керамический цилиндр, заполненный воздухом. На внешнюю поверхность керамического цилиндра крепился электрический нагреватель. Вся нагревательная система помещалась в теплоизолированный кожух, установленный на подвижную каретку. На этой же карете закреплялась высокоскоростная видеокамера Photron FASTCAM SA4 5 (скорость видеосъемки до 20 000 кад/с). Каретка устанавливалась на рельсы. С целью предотвращения тепловых потерь торцы полого цилиндра закрывались специальными теплоизоляционными заслонками.

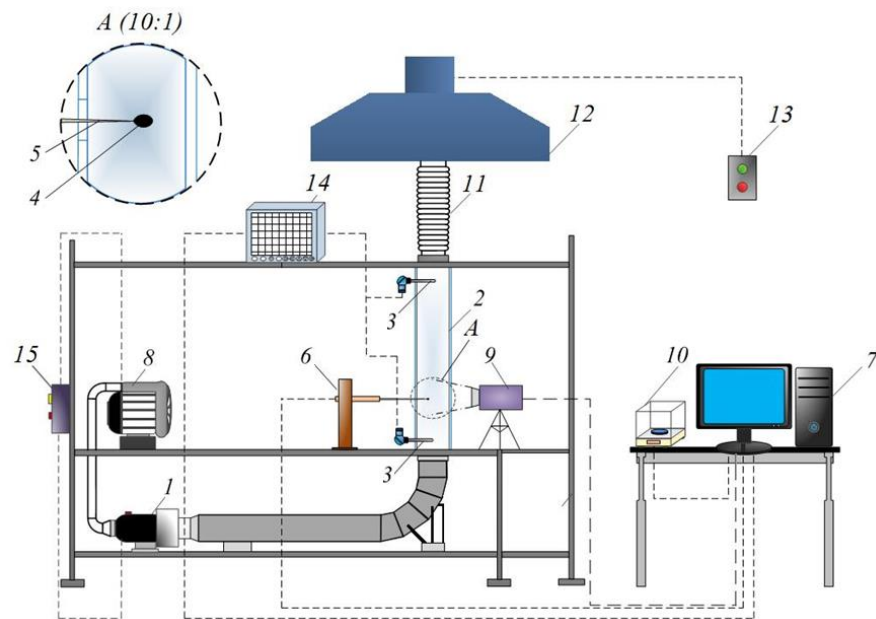


Рисунок 3 - Схема экспериментального стенда: 1 – теплогенератор; 2 – полый прозрачный кварцевый цилиндр; 3 – термоэлектрический преобразователь; 4 – частица древесины; 5 – игольчатая термопара; 6 – координатное устройство; 7 – персональный компьютер; 8 – нагнетатель; 9 – высокоскоростная видеокамера; 10 – аналитические весы; 11 – гибкий отводящий газопровод; 12 – короб вытяжной вентиляции.

Вторая группа экспериментов проведена на экспериментальном стенде, моделирующем условия радиационно-конвективного нагрева (рис. 3). Стенд по своей структуре, схеме формирования условий нагрева, методам регистрации и обработки результатов эксперимента аналогичен стенду. Установка представляла собой вертикально расположенный полый кварцевый цилиндр. Окислитель (воздух) при помощи вихревого компрессора нагнетался в теплогенератор, где нагревался до температур, заданных по условиям эксперимента. После теплогенератора высокотемпературный воздух по системе теплоизолированных трубопроводов подавался в полый кварцевый цилиндр. Температура потока воздуха T_g (непосредственно перед частицей топлива) контролировалась хромель-алюмелевыми термопарами [27]. Частица древесной биомассы крепилась на игле-держателе и при помощи дистанционно-

управляемого координатного устройства (соединенного с ЭВМ) устанавливалась на оси симметрии цилиндра. Весь комплекс процессов термической подготовки, зажигания и горения частиц древесной биомассы регистрировался высокоскоростной видеокамерой.

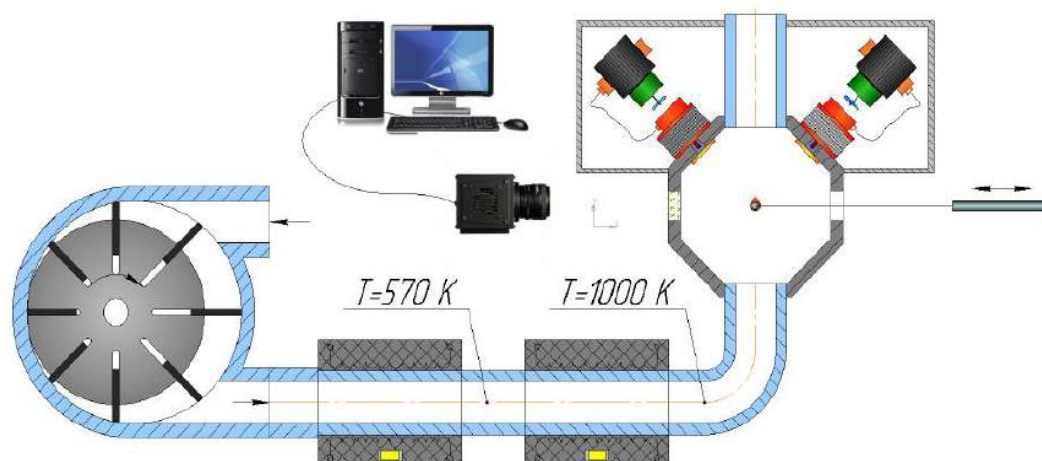


Рисунок 4 - Схема экспериментального стенда по изучению процессов зажигания частиц древесной биомассы в условиях РК-МВ нагрева: 1 – теплогенератор; 2 – полый прозрачный кварцевый цилиндр; 3 – термоэлектрический преобразователь; 4 – частица древесины; 5 – игольчатая термопара; 6 – координатное устройство; 7 – персональный компьютер; 8 – нагнетатель; 9 – высокоскоростная видеокамера.

Третий экспериментальный стенд (рисунок 4) по своей структурной схеме и основной элементной базе схож с экспериментальным стендом, приведенном на рисунке 2. Отличие заключается в том, что полый керамический цилиндр заменен на камеру горения в форме додекаэдра (рисунок 4), расположенную в теплоизолированном кожухе. Сквозь эту камеру продувался высокотемпературный воздух. В верхней полусфере камеры горения монтировались системы из четырех подсистем «магнетрон-волновод-антенна» таким образом, чтобы топливная частица, помещенная на линии симметрии цилиндра, попадала в фокус излучения. Все процессы термической подготовки,

зажигания и горения регистрировались высокоскоростной видеокамерой. Конфигурации экспериментальных стендов позволяла изучать процессы зажигания и горения частиц древесной биомассы в существенно отличающихся условиях нагрева: радиационный, радиационно-конвективный, радиационно-конвективно-микроволновый нагрев.

2.2 Экспериментальные образцы

В экспериментах использовались частицы древесной биомассы, вырезанные из монолитного сухого фрагмента древесины (сосна) больших размеров, влажность которого составляла 5-8 %. В дальнейшем при помощи шлифовального и фрезерного устройств проводилась подготовка поверхности частиц и придание соответствующей формы (куб). Исследовался процесс зажигания частиц древесной биомассы с характерными размерами $d=3$ мм.

При выборе характерных размеров частиц учитывалась необходимость сжигания в топках паровых и водогрейных котлов диспергированной древесины. Наиболее простым вариантом использования древесной биомассы являются отходы лесопиления и деревообработки (опилки). Характерный размер частиц, образующихся после пиления древесины, зависит от размеров зубьев пилы и составляет в условиях пиления от 0,5 мм до 2 мм для наиболее широко используемых хвойных пород древесины.

В условиях низкотемпературного нагрева (в период запуска котельного агрегата в работу) времена задержки зажигания таких частиц составляют от 1 до 20 секунд в зависимости от влажности топлива.

Можно сказать, что возможные большие значения t_{ign} существенно затрудняют проектирование топочных устройств котельных агрегатов. Соответственно, имеет смысл разрабатывать такие камеры сгорания, в которых интенсификация нагрева топливных частиц обеспечивается подсветкой топливного факела, например, при помощи СВЧ.

Значение для практики также имеют экспериментальные данные о временах задержки зажигания групп частиц относительно больших (3-6 мм) размеров, которые образуются в условиях дробления древесины (не деловой), предназначенной для использования в качестве топлива (или добавки к основному топливу котельных установок большой и малой энергетики). По этим причинам эксперименты проведены с частицами древесины, характерные размеры которых составляли 3,0 мм.

2.3 Методика планирования и проведения экспериментов

Для определения временных характеристик процесса воспламенения проводились серии из 15 экспериментов для каждого значения T_g . Экспериментальные результаты обрабатывались с использованием статистических методов. Количество экспериментов варьировалось (но не менее 15 при идентичных температурах внешней среды), чтобы свести к минимуму погрешности при определении t_{ign} .

При планировании экспериментальных исследований авторами проведен анализ влияющих на значение систематических и случайных погрешностей параметров факторного пространства. С целью уменьшения числа этих параметров использован метод классической нелинейной регрессивной модели. При изучении процессов зажигания, логично использовать модель Аррениусовского типа. Такая модель сводится к системе линейных дифференциальных уравнений [67]:

$$\eta(x, \theta) = \sum_{i=1}^m \theta_i \exp(-\theta_{i+m} x) \quad (1)$$

Где $\eta(x, \theta)$ – функция, заданная на $X \times \Theta$ ($\Theta \subset \mathbb{R}^m$) и нелинейно зависящая от набора $\{\theta_i\}_{i=1}^m$, $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_i, \dots, \theta_m)^T$ – вектор неизвестных и подлежащих оценке параметров. Точки $x_1, \dots, x_i, \dots, x_m$, в которых регистрируются значения случайных величин $y(x_i) = \eta(x_i, \theta) + \varepsilon_i$ ($i=1, \dots, n$), где ε_i – взаимно

независимые случайные величины, имеющие распределение с нулевым средним и дисперсиями $\sigma_i^2 = \sigma(x_i)$. Задача планирования эксперимента сводит к поиску предикторной оценки МНК $\hat{\theta} = \arg \inf_{\theta \in \Theta} Q(\theta)$ при условии выполнения $\nabla Q(\theta) = 0$. Для этого применялся метод Гаусса-Ньютона, суть которого заключается в аппроксимации $\eta(x, \theta)$, линейной функцией в окрестности точки θ_{real} :

$$\eta(x, \theta) \cong \eta(x, \theta_{\text{real}}) + (\theta - \theta_{\text{real}})^T \nabla \eta(x, \theta_{\text{real}}) \quad (2)$$

В соответствии с моделью (1) можно обосновано предположить, что для адекватного отображения зависимостей t_{ign} от температуры внешней среды достаточно проводить регрессионный анализ и строить функции $t_{\text{ign}}(T_g)$ по трём значениям T_g .

Также стоит добавить, что при изучении процессов воспламенения и горения зависимости времен задержки зажигания, времени горения, интенсивности образования того или иного продукта реакции от температуры, как правило, обладают всеми свойствами кривых экспоненциального типа. Поэтому можно обосновано предположить, что в соответствии с основными положениями теории планирования эксперимента для построения экспоненциальных зависимостей типа $t_{\text{ign}}(T_g)$ достаточно трёх точек.

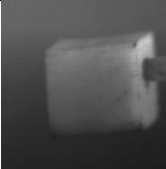
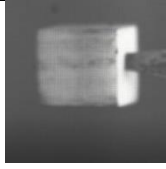
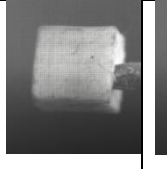
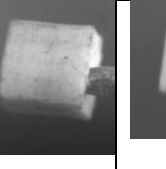
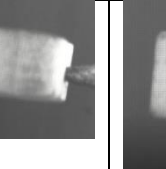
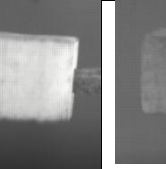
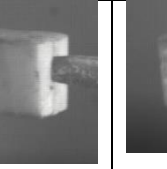
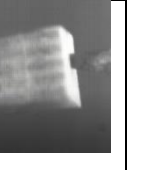
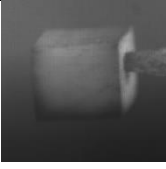
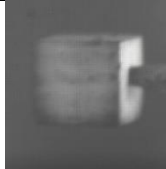
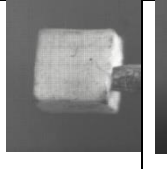
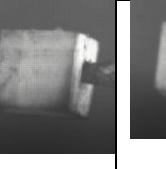
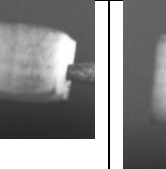
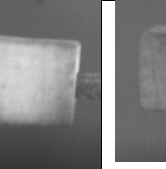
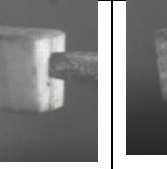
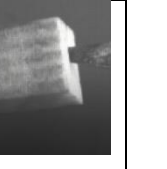
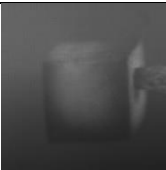
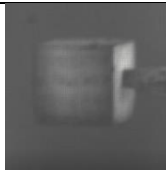
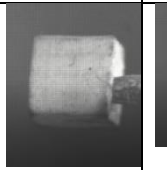
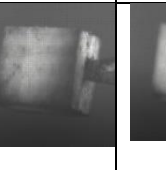
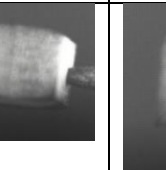
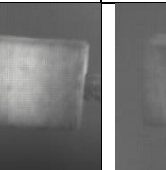
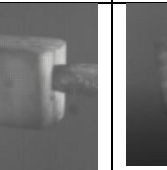
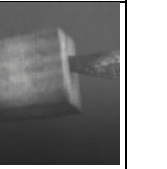

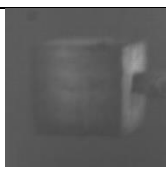
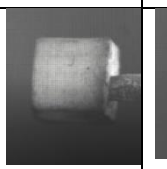
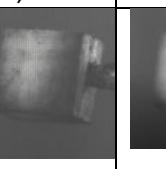
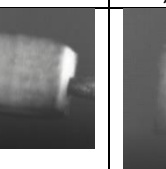
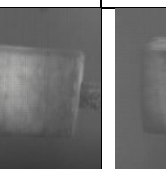

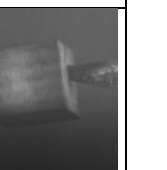
Обработка результатов экспериментальных исследований проведена в соответствии с теориями статистической обработки результатов эксперимента и распределения случайных величин в приближении о Гауссовом распределении значений времен задержки зажигания (для каждого отдельного значения T_g). Оценка влияния того или иного элемента факторного пространства \mathbb{N} (температура внешней среды, влажность древесины и т.д.) проводилась в соответствии с критерием Вилкоксона (для зависимых выборок) и Мана-Уитни.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

3.1 Зажигание частиц древесного биотоплива

Установление основных элементов теории процесса инициирования горения частиц древесной биомассы является важным этапом в разработке технологии сжигания древесной биомассы. По этой причине имеет смысл проведение детального анализа комплекса процессов термической подготовки и воспламенения частиц топлива. На рисунке 5,6,7 приведены кадры постепенного зажигания частиц древесного биотоплива при температурах 713К, 753К, 785К в условиях зажигания с СВЧ и без.

Рисунок 5 – Постепенное зажигание частиц древесного биотоплива при 713К

713К								
	1 К сух.	2 К.с.свч.	3 К.влж	4 К в.свч	5 С.сух.	6 С.с.свч.	7 С.влж.	8 С.в.свч
a								
	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s
b								
	T=5,6 s	t=4 s	t=4,5 s	t=3,9 s	t=5,5 s	t=4,9 s	t=5,8 s	t=5 s
c								
	T=11,2 s	t=8 s	t=9 s	t=7,8 s	t=11 s	t=9,8 s	t=11,6 s	t=10 s
d								
	T=16,8 s	t=12 s	t=13,5 s	t=11,7 s	t=16,5 s	t=14,7 s	t=17,4 s	t=15 s

e								
	T=22,4 s	t=16 s	t=18 s	t=15,6 s	t=22,1 s	t=19,6 s	t=23,2 s	t=20 s
f								
	T=28 s	t=20 s	t=22,5 s	t=19,5 s	t=27,6 s	t=24,5 s	t=29 s	t=25 s
g								
	T=33,6 s	t=24 s	t=27 s	t=23,8 s	t=33,2 s	t=29,7 s	t=34,7 s	t=30,9 s
h								
	T=t _{ign}	T=t _{ign}	T=t _{ign}	T=t _{ign}	T=t _{ign}	T=t _{ign}	T=t _{ign}	T=t _{ign}

Рисунок 6 – Постепенное зажигание частиц древесного биотоплива при 753К

	1 К сух.	2 К.с.свч.	3 К.влж	4 К в.свч	5 С.сух.	6 С.с.свч.	7 С.влж.	8 С.в.свч
a								
	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s
b								
	t=4,5 s	t=3,8 s	t=3,6 s	t=3,3 s	t=2,9 s	t=2,5 s	t=4,9 s	t=4,6s
c								
	t=9 s	t=7,6 s	t=7,4 s	t=6,6 s	t=5,8 s	t=5 s	t=9,8 s	t=9,2 s

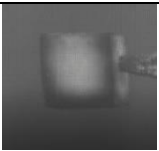
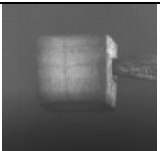
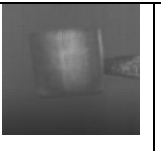
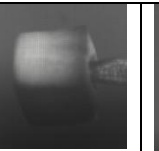
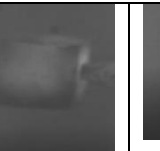
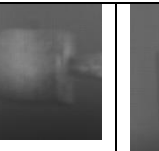
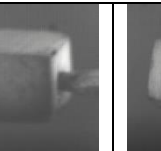

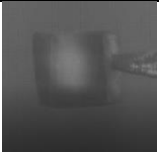
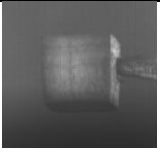

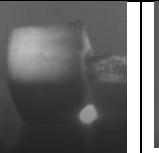
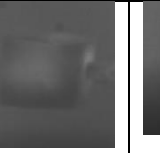
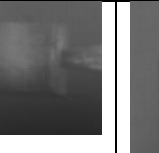
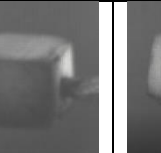

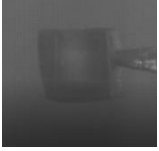
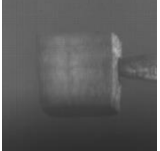

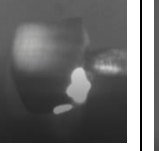
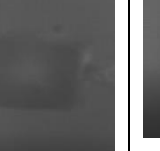
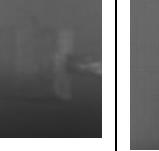
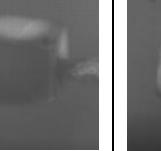
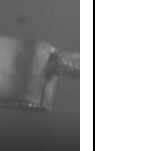
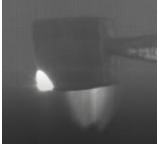
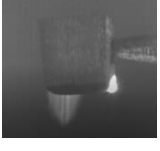
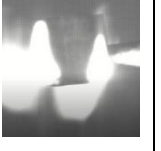
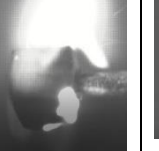

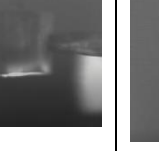
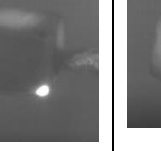




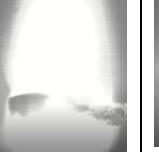

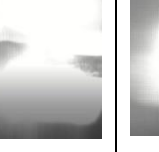


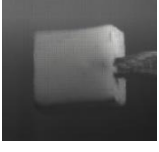
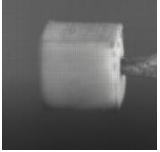
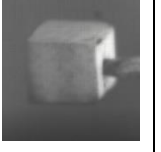
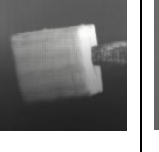
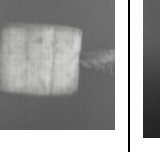
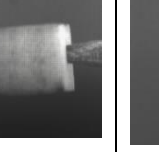
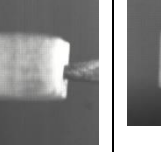
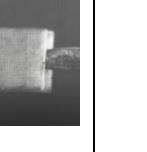

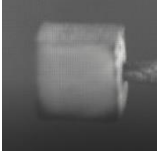

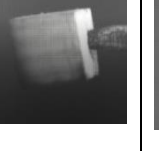
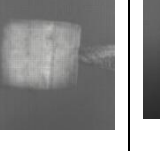
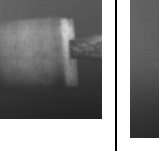
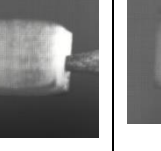
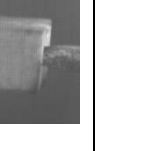



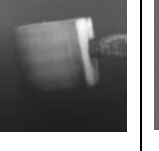
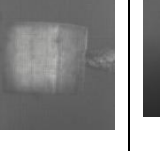
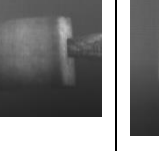
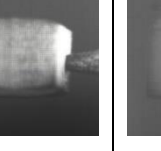
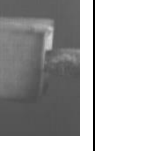
d								
	t=13,5 s	t=11,4 s	t=11,2 s	t=9,9 s	t=8,7 s	t=7,5 s	t=14,7 s	t=13,8 s
e								
	t=18 s	t=15,2 s	t=15 s	t=13,2 s	t=11,6 s	t=10 s	t=19,6 s	t=18,4 s
f								
	t=22,5 s	t=19 s	t=18,8 s	t=16,5 s	t=14,5 s	t=12,5 s	t=24,5 s	t=23 s
g								
	t=27 s	t=23 s	t=22,8 s	t=20,3 s	t=17,6 s	t=15 s	t=29,6 s	t=27,7 s
h								
	T=t _{ing}	T=t _{ing}	T=t _{ing}	T=t _{ing}	T=t _{ing}	T=t _{ing}	T=t _{ing}	T=t _{ing}

Рисунок 6 – Постепенное зажигание частиц древесного биотоплива при 785К

	1 К сух.	2 К.с.свч.	3 К.влж	4 К в.свч	5 С.сух.	6 С.с.свч.	7 С.влж.	8 С.в.свч
a								
	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s	t=0 s
b								
	t=2 s	t=1,7 s	t=3,4 s	t=2,2 s	t=2,6 s	t=2,1 s	t=4 s	t=3,4 s
c								

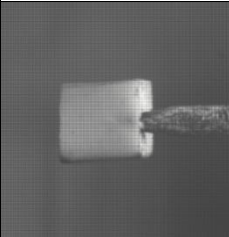
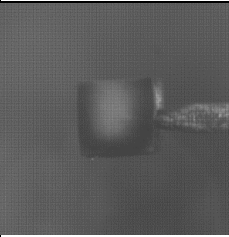
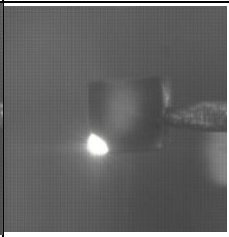
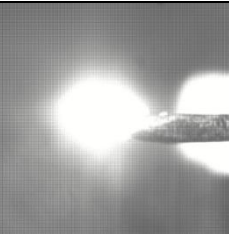
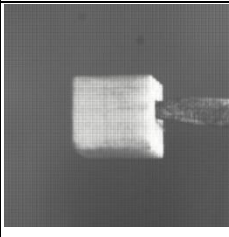
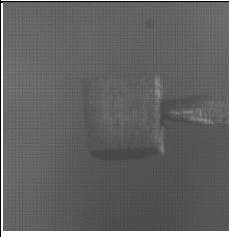
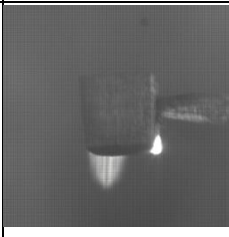

	t=4 s	t=3,4 s	t=6,8 s	t=4,4 s	t=5,2 s	t=4,2 s	t=8 s	t=6,8 s
d								
	t=6 s	t=5,1 s	t=10,2 s	t=6,6 s	t=7,8 s	t=6,3 s	t=12 s	t=10,2 s
e								
	t=8 s	t=6,8 s	t=13,6 s	t=8,8 s	t=10,4 s	t=8,4 s	t=16 s	t=13,6 s
f								
	t=10 s	t=8,5 s	t=17 s	t=11 s	t=13 s	t=10,5 s	t=20 s	t=17 s
g								
	t=12 s	t= 10,3 s	t=20,5 s	t=13,6 s	t=15,9 s	t=12,7 s	t=24,2 s	t=20,9 s
h								
	T=t _{ing}	T=t _{ing}	T=t _{ing}	T=t _{ing}	T=t _{ing}	T=t _{ing}	T=t _{ing}	T=t _{ing}

На рис. 7, 8 приведены кадры типичной видеограммы, демонстрирующие процесс воспламенения частицы древесины (не насыщенной влагой – рис. 7; с влажностью 47 % – рис. 4) в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве. Анализ кадров показывает, что процесс термической подготовки можно условно разделить на ряд последовательных взаимосвязанных стадий. При попадании в высокотемпературную среду и СВЧ-поле (стоячая волна) топливная частица нагревается за счет конвекции и излучения, а также вследствие поглощения СВЧ-излучения. Такое сложное тепловое воздействие инициирует интенсивное испарение внутриводной и адсорбционно-связанной влаги. Дальнейший нагрев приводит к термическому разложению основных компонентов

биомассы. Последнее характеризуется обугливанием поверхности частицы (рис. 7, 8 столбец II, характерное потемнение поверхности биомассы).

При этом можно отметить, что размер частиц несколько уменьшается (рис. 9). Детальный (при большом увеличении) анализ кадров показал, что размеры частицы в среднем уменьшаются на 13 %. Скорее всего, это связано с термической деструкцией основного слоя топлива, приводящей к формированию высокопористого угольного каркаса с низким коэффициентом ударной вязкости. Как показано в [28], пары воды и газообразные продукты термодеструкции основных компонентов биомассы фильтруются сквозь пористый угольный каркас и вступают в химическую реакцию с углеродом.

В результате внутри частицы формируются газообразные продукты реагирования. Образующаяся во внутрипоровой структуре парогазовая смесь приводит к росту внутреннего давления в частице (как показано по результатам математического моделирования [28]) и, соответственно, к диспергированию приповерхностного слоя топлива, и уносу его части вследствие аэродинамического воздействия внешним потоком.

		I	II	III	IV
Кедр/Cedar	a				
		t=0 с.	t=13,7 с.	t _{ign} =27,37 с.	t=30,3 с.
	b				
		t=0 с.	t=11,6 с.	t _{ign} =23,28 с.	t=26,28 с.

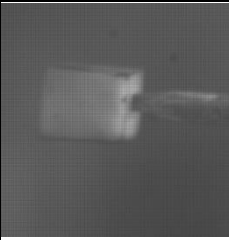
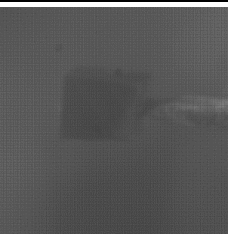
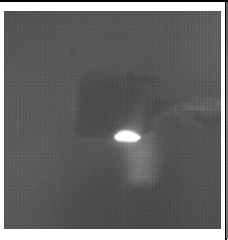

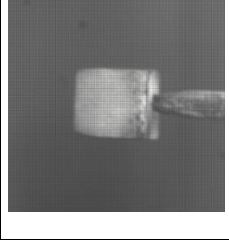

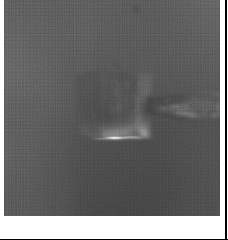
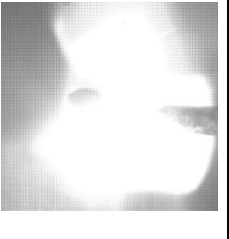
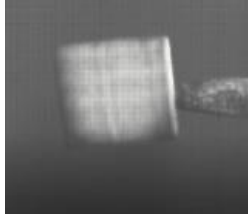
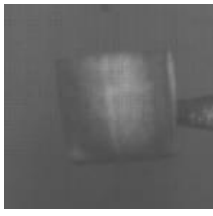


Сосна/Pine	a				
		t=0 с.	t=9 с.	t _{ign} =18 с.	t=21 с.
	b				
		t=0 с.	t=7,5 с.	t _{ign} =15 с.	t=18 с.

Рисунок 7 - Типичные кадры процесса воспламенения сухих частиц древесной биомассы при температуре внешней среды $T_g=753$ К (а) в условиях радиационно-конвективного нагрева; б) в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве)

Летучие продукты пиролиза совместно с водяными парами вдуваются во внешнюю среду, где перемешиваются с окислителем и вступают в термохимическое взаимодействие с кислородом воздуха. В результате происходит воспламенение частицы топлива (рис. 3, 4, III). Формируется сфера пламени, которая по своим размерам, как правило, превышает размер частицы (рис. 3, 4, IV).

		I	II	III	IV
Кедр/Cedar	a				
		t=0 с.	t=11,4 с.	t _{ign} =22,8 с.	t=27,8 с.

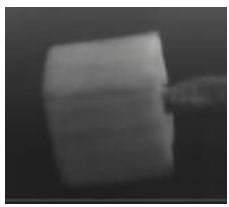
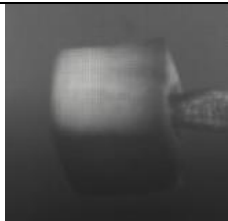
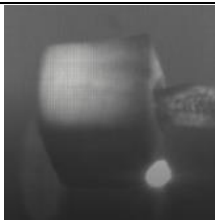

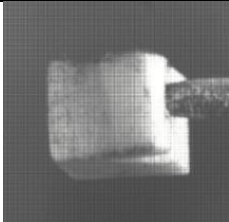
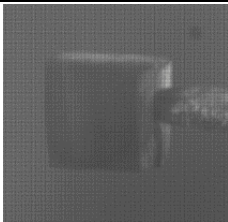
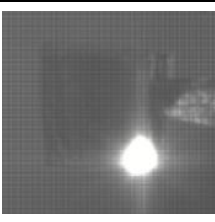
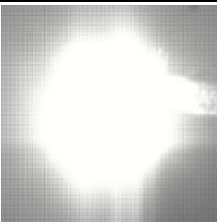
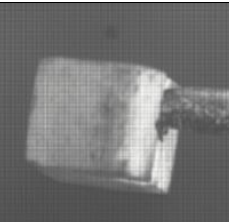
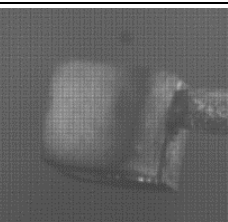
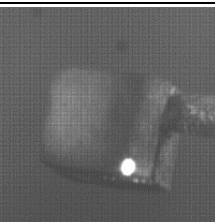
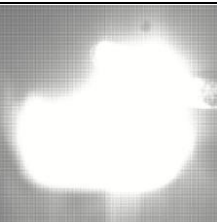
	b				
		t=0 с.	t=10,2 с.	t _{ign} =20,37 с.	t=25,37 с.
Сосна/Pine	a				
		t=0 с.	t=14,8 с.	t _{ign} =29,6 с.	t=34,6 с.
	b				
		t=0 с.	t=13,85 с.	t _{ign} =27,7 с.	t=32,7 с.

Рисунок 8 - Типичные кадры процесса воспламенения влагонасыщенных частиц древесной биомассы при температуре внешней среды $T_g=753$ К (а) в условиях радиационно-конвективного нагрева; б) в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве)

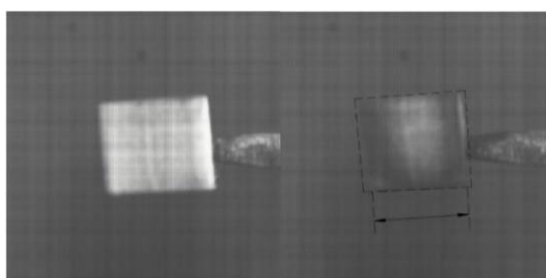


Рисунок 9 - Изменение размера топлива в процессе пиролиза древесной частицы

3.2 Времена задержки воспламенения

Одним из важнейших параметров, оказывающих существенное влияние на выбор конструктивных характеристик топочных устройств котельных агрегатов, является время задержки зажигания. Это обусловлено в первую очередь тем, что значения t_{ign} определяют размеры топочных камер, формирование аэродинамического режима топочной камеры, температуры горелочного воздуха. Например, увеличение значений времен задержки зажигания приведет к увеличению размеров камеры сгорания. По этой причине определение по результатам экспериментов значений времен задержки зажигания является важным этапом построению общей теории зажигания твердых топлив различной природы, на основе которой уже разрабатывается методика обоснования выбора конструктивных характеристик котельных агрегатов.

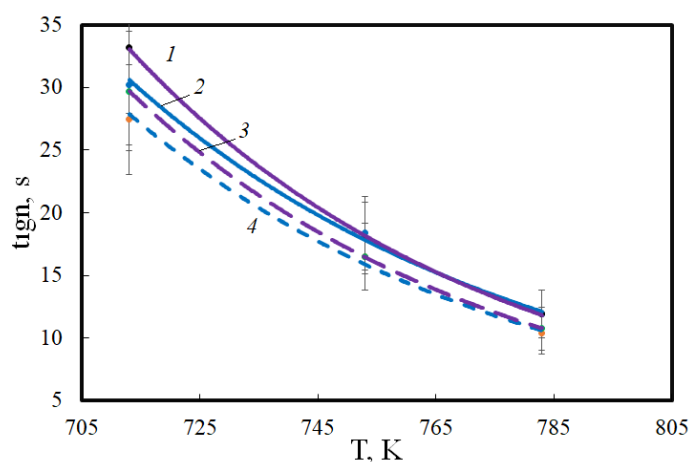


Рисунок 11 - Зависимости времен задержки зажигания сухих древесных частиц от температуры внешней среды: 1, 3 – частицы кедра; 2, 4 – частицы сосны; 1, 2 – радиационно-конвективный нагрев; 3, 4 – радиационно-конвективно-микроволновой нагрев.

На рис. 11 приведены зависимости времен задержки зажигания сухих частиц древесной биомассы (сосны и кедра) в условиях относительно низких

температур внешней среды при радиационно-конвективном и радиационно-конвективно-микроволновом нагревах.

На основании анализа рис. 11 можно сделать вывод, что микроволновое воздействие приводит к достаточно заметному ускорению процесса воспламенения частиц древесной биомассы в диапазоне температур среды от 713 до 783 К. В области относительно низких температур (от 713 до 753 К) воздействие СВЧ-излучения приводит к росту скорости зажигания в среднем на 12 %.

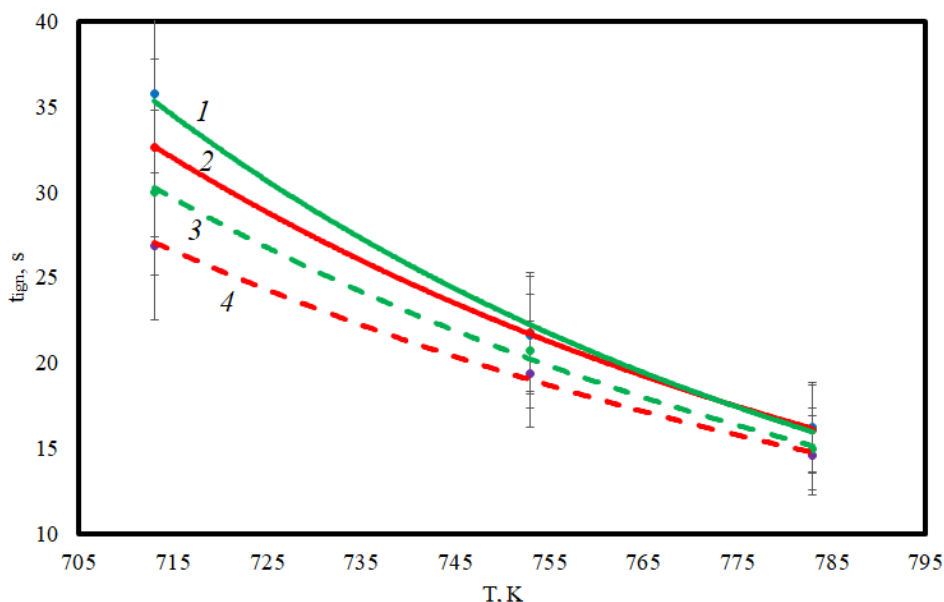


Рисунок 12 - Зависимости времен задержки зажигания влажных древесных частиц от температуры внешней среды: 1, 3 – частицы кедра; 2, 4 – частицы сосны; 1, 2 – радиационно-конвективный нагрев; 3, 4 – радиационно-конвективно-микроволновой нагрев;

На рис. 12 приведены зависимости времен задержки зажигания влагонасыщенных частиц древесины в условиях радиационно-конвективного и радиационно-конвективно-микроволнового нагревов. Анализ результатов, приведенных на рис. 6, 7, показал, что температуры окислительной среды оказывает меньшее влияние на времена задержки зажигания влагонасыщенной

древесины по сравнению с сухой. Так, для сухих частиц древесины при увеличении T_g с 713 до 785 К времена задержки зажигания уменьшались практически в 3 раза. Для влажных частиц в том же температурном диапазоне снижение происходило лишь в 1,8 раз. Но при этом влажные древесные частицы под воздействием СВЧ-излучения зажигаются в среднем на 18 % быстрее по сравнению с условиями воздействия радиационно-конвективного нагрева. Сравнительный анализ рисунка 7, 8 показывает, что наибольший эффект от микроволнового воздействия достигается при зажигании влагонасыщенных частиц древесной биомассы.

Стоит отметить, что низкотемпературное сжигание топлива является перспективным направлением развития котельной техники. Это обусловлено тем, что при работе низкотемпературных топочных устройств существенно снижаются выбросы оксидов азота (NO_x) и серы (SO_x). Также надо сказать, что снижение температуры внутритопочной среды очевидно приведет к росту надежности работы котельного агрегата за счет уменьшения интенсивности формирования золового слоя на поверхностях теплообмена (вследствие снижения температуры горения ниже температуры начала шлакования), а также снижения рисков возникновения подшламовой коррозии.

Одним из важнейших параметров, оказывающим существенное влияние на обоснование выбора технологической схемы топливосжигания, режимов сжигания топлива, температуры воздуха в первичном и вторичном дутье, температуры предварительного прогрева топочного пространства является предельная температура зажигания (по терминологии В.И. Вилюнова). Последняя определяет такое значение температуры, до которой необходимо нагреть поверхность топливной частицы, чтобы стабильно происходило термохимическое взаимодействие горючего и окислителя (т.е. такая реакция, когда соблюдается условие - скорость притока теплоты за счет сгорания горючего превышает скорость оттока теплоты вследствие теплообмена с внешней средой). По этой причине необходимо установление по результатам

экспериментов влияния микроволнового нагрева топливных частиц на значения предельной температуры их воспламенения.

3.3 Теоретическая оценка влияния микроволнового воздействия на температуру частицы древесины

При проведении опытно-конструкторских работ по проектированию топочных и горелочных устройств котельных агрегатов, сжигающих конденсированные топлива, важной является оценка величины теплового потока (q_h), к поверхности топливной частицы. Как правило, необходимо определить минимально достаточные значения q_h , при которых происходит гарантированное воспламенение в заданном диапазоне значений t_{ign} . Такой анализ позволяет обосновать оптимальный выбор технологической схемы (например, с предтопком или без него), рабочих параметров топочного пространства (температура поверхностей теплообмена) и горелочных устройств (температура дутьевого воздуха). По этой причине имеет смысл провести оценку значений тепловых потоков к поверхности частицы древесины. Значение теплового потока q_{mic} (Вт), выделяемого в слое древесной биомассы вследствие поглощения микроволнового излучения, рассчитывается по формуле:

$$q_{mic} = \varepsilon \cdot f \cdot tg\delta \cdot |E|^2 \cdot V$$

Где ε – диэлектрическая проницаемость, Φ/m ; f – частота электромагнитного поля, Гц; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; E – напряженность электромагнитного поля, В/м; V – объем частицы, m^3 . Радиационный тепловой поток рассчитывался в соответствии с законом Стефана-Больцмана [83]:

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T_p^4) F$$

где ε – степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцмана $Вт/м^2K^4$; T_g – температура газа; T_p – температура поверхности частицы; F – площадь

поверхности частицы, м². Конвективный тепловой поток рассчитывался в соответствии с приближением Ньютона-Рихмана

$$q_{con} = \alpha(T_g - T_p)F$$

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot Nu}{d}$$

$$Nu = C_1 \cdot Re^{C_2}$$

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$$

α – коэффициент теплоотдачи Вт/м²К; T_g – температура газа; T_p – температура поверхности частицы; F – площадь поверхности частицы, м²; λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·К); Nu – критерий Нуссельта; C_1 и C_2 – эмпирические константы; d – характерный размер частицы; Re – критерий Рейнольдса; V – скорость движения теплоносителя, м/с; ν – кинематический коэффициент вязкости теплоносителя, м²/с.

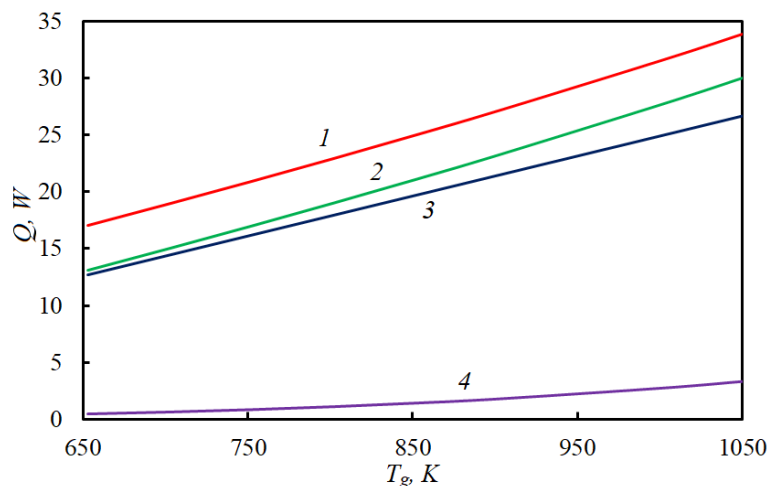


Рисунок 13 - Зависимости значений теплового потока q_h при различных условиях нагрева от температуры: 1 - радиационно-конвективно-микроволновый нагрев; 2 – радиационно-конвективный тепловой поток; 3 – конвективный тепловой поток; 4 – радиационный тепловой поток

На рисунке 13 приведены зависимости значений тепловых потоков, воздействующих на частицу древесной биомассы, от температуры внешней среды.

На рисунке 14 приведены предельные значения температуры воспламенения (T_{ign}). Можно отметить, что значения T_{ign} при радиационном и радиационно-конвективном нагреве отличаются незначительно (отличия не более чем на 3 %).

Но в условиях радиационно-конвективно-микроволнового нагрева предельная температура внешней среды, при которой происходит стабильное воспламенения, значительно уменьшается (более чем на 60 %). Это, скорее всего, обусловлено тем, что при микроволновом воздействии происходит существенный нагрев не только приповерхностных, но и глубинных слоёв топлива.

Последнее приводит к значительному росту температуры по всему объёму частицы древесной биомассы. В результате значительно интенсифицируется весь комплекс процессов термической подготовки и, соответственно, термического разложения основных компонентов биомассы. Последнее приводит к росту скорости притока газообразных продуктов пиролиза в пограничный слой частицы. При этом стоит отметить, что летучие вдуваются в зону термохимического взаимодействия с окислителем уже значительно нагретые за счёт поглощения электромагнитной энергии.

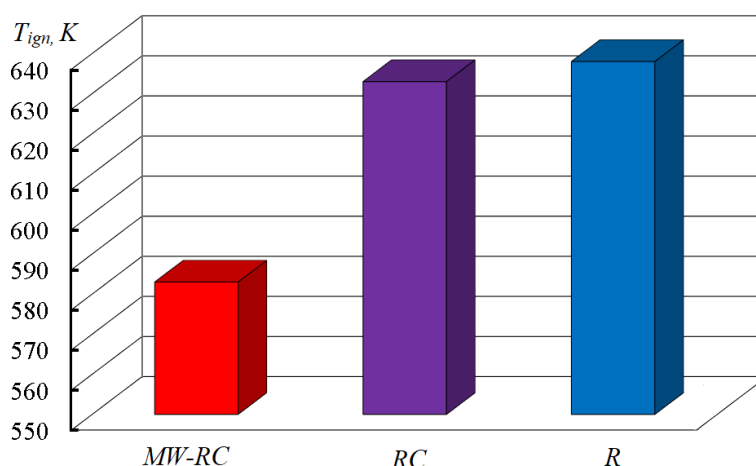


Рисунок 14 - Значения предельной температуры зажигания

В этой связи можно сказать, что применение микроволнового излучения в технологиях топливосжигания имеет существенные перспективы в предпусковом и пусковом режимах работы котельного агрегата, а также при сжигании в циркулирующем слоевом предтопке высоковлажной древесной биомассы.

Можно отметить, что практически во всем диапазоне температур внешней среды (от 650 К до 1050 К) конвективный поток много больше радиационного. Последнее связано с тем, что в условиях эксперимента частица древесной биомассы крепилась на державке и, соответственно, была неподвижна. В этих условиях конвективный тепловой поток много больше по сравнению с радиационным и микроволновым нагревом. Такие условия нагрева соответствуют процессам зажигания в камерах сгорания котельных агрегатов, работающих по технологии циркулирующего кипящего слоя. Также можно отметить, что микроволновое воздействие значительно интенсифицирует (на 10-20 %) нагрев частицы древесной биомассы.

3.4 О применимости результатов экспериментальных и теоретических исследований в реальной практике

Результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований дают основания для вывода о высокой перспективности применения технологии микроволнового воздействия на частицы древесной биомассы в период их зажигания и горения. При этом по результатам экспериментов установлено, что в этом случае появляется возможность сжигать древесину в дробленном виде (другими словами, с характерным размером частиц $d=2-6$ мм).

Результаты экспериментов показывают, что применение дополнительного СВЧ-воздействия для стабилизации процесса зажигания и горения частиц древесины наиболее приемлемо при сжигании в низкотемпературном режиме (например, в низкотемпературном вихре по аналогии с топками Шершнева). Это

так называемые «низконапряженные» топочные устройства. В этих условиях накопленной (за счет теплоемкости) топочным пространством (продукты сгорания, поверхности теплообмена и др.) теплоты не хватает для стабильного зажигания частиц топлива. Эту «нехватку» минимальной (необходимой для стабильного зажигания) энергии может восполнить электромагнитное воздействие. В свете того, что на настоящее время одним из наиболее перспективных направлений в котлостроении является разработка энергоэффективных низкотемпературных технологии сжигания топлив со сверхнизкой эмиссией NO_x и SO_x метод микроволнового нагрева топлива может получить новый импульс развития. Такое технологическое решение позволяет директивно понизить температуру горения в топочном пространстве и, соответственно, минимизировать (насколько это возможно) формирование оксидов азота и серы в продуктах сгорания топлива при этом, практически не снизив энергетических характеристик котельного агрегата (термический КПД, паропроизводительность, параметры острого пара на выходе из котла: давление P , температура T_0). В перспективе, с использованием технологии СВЧ-нагрева топливных частиц в сочетании с технологией совместного сжигания древесной биомассы с углем (древесно-угольные смеси) и аммиаком при электронно-лучевом воздействии можно добиться полного секвестрования NO_x и SO_x .

По результатам проведенных экспериментов установлено, что эффективность микроволнового воздействия возрастает при зажигании влагонасыщенной биомассы. Последнее создает предпосылки возможности сжигания влажной (без проведения процедуры предварительной термической подготовки - сушки) древесной биомассы в топочных устройствах. При этом, как установлено по результатам теоретических и экспериментальных исследований, сжигание влагонасыщенных топлив приводит к значительному секвестрованию оксидов серы и азота.

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

Студенту:

Группа 5БМ14	ФИО Омаров Азимхан Адилханович
------------------------	------------------------------------------

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ И.Н.Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 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>	<i>Стоимость выполняемых работ, материальных ресурсов, согласно применяемой техники и технологии, в соответствии с рыночными ценами. Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>- районный коэффициент - 1,3; - коэффициент дополнительной заработной платы - 1,12; - накладные расходы – 20%; - норма амортизации 15%.</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>- страховые взносы во внебюджетные фонды 30,2%.</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Анализ потенциальных потребителей результатов исследования, конкурентных технических решений, оценка готовности проекта к коммерциализации,</i>
2. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски</i>	<i>Планирование управление НТИ: – определение структуры работ; – определение участников пунктов работ; – определение продолжительности работ; – Формирование бюджета затрат НТИ; – материальные затраты проекта; – затраты на оборудование; – основная заработная плата исполнителей</i>
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Расчет показателей сравнительной эффективности проекта, интегрального показателя ресурсоэффективности</i>

Перечень графического материала

<ol style="list-style-type: none"> 1. Перечень работ и оценка их выполнения 2. Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ» 3. Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2023 г.
-------------------------------------------------------------	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	К.Э.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ14	Омаров Азимхан Адилханович		

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Темой выпускной работы является физическое моделирование процесса воспламенения частицы древесной биомассы в условия радиационно-конвективно-микроволнового нагрева.

Данный раздел посвящен оценке эффективности исследования, определению экономической целесообразности теоретического и экспериментального исследования посвященного зажигания древесной биомассы в условиях, соответствующих для топочных устройств комбинированного нагрева.

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

4.1 Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

План управления научным проектом включает в себя следующие элементы:

- перечень работ и оценку времени их выполнения;
- смету затрат.

4.1.1 Перечень работ и оценка времени их выполнения

В таблице 1 приведен полный перечень работ, количество исполнителей и время выполнения дипломного проекта.

Таблица 1 – перечень работ

№ п/п, наименование работы	Количество исполнителей	Продолжительность, дни
----------------------------	-------------------------	------------------------

1. Выдача и получение задания;	Научный руководитель (НР)/Инженер	1
2. Аналитический обзор литературы;	Инженер	17
3. Разработка физической модели;	Инженер	7
4. Решение задачи;	Инженер	15
5. Решение тестовых задач;	Инженер	3
6. Анализ результатов;	Научный руководитель/	1
	Инженер	10
7. Проведение экспериментального исследования;	Инженер	15
8. Оформление выпускной квалификационной работы;	Инженер	5
9. Проверка ВКР;	Научный руководитель/	4
	Инженер	1
Итого:	НР-7 дней; Инженер – 107 дней.	

4.2 Смета затрат

Затраты на выполнение проекта рассчитываются по формуле:

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

где $K_{\text{мат}}$ - материальный затраты, руб;

$K_{ам}$ - амортизация компьютерной техники, руб;

$K_{з/пл}$ - отчисления на заработную плату, руб;

$K_{с.о}$ - затраты на социальные отчисления, руб;

$K_{пр}$ - прочие затраты, руб;

$K_{накл}$ – накладные расходы, руб;

4.2.1 Материальные затраты

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

4.2.2 Амортизация компьютерной техники и экспериментального оборудования

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

Амортизация компьютерной техники рассчитывается:

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} * Ц_{кт} * \frac{1}{T_{сл}} = \frac{107}{365} * 25000 * \frac{1}{7} = 1046 \text{ руб/год} \quad (2)$$

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

$T_{кал}$ – календарной время;

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

$T_{сл.}$ – срок службы, лет.

Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Таблица 2 - Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования шт.	Цена единицы оборудования руб.	Амортизация экспериментального оборудования руб.	Суммарные отчисления на амортизацию техники и оборудования руб.
1.	Теплогенератор	1	250 000	3424	11 332
2.	Микроволновая печь	1	5 000	41	
3.	Нагнетатель воздуха	1	30 000	246	
4.	Высокоскоростная камера	1	800 000	6575	
5.	Персональный компьютер	1	25 000	1046	

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15 % от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного научного проекта и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в виде амортизационных отчислений. Все расчеты по приобретению спецоборудования и оборудования, имеющегося в организации, но используемого для выполнения конкретной темы, сводятся в табл. 2.

Экспериментальное оборудование включает в себя:

1. Теплогенератор;
2. Микроволновая печь;
3. Нагнетатель воздуха
4. Высокоскоростная камера;

Амортизация экспериментального оборудования определяется по формуле (124):

$$K_{\text{ам тепл генер}} = \frac{15}{365} * 250000 * \frac{1}{3} = 3424 \frac{\text{руб}}{\text{год}}$$

$$K_{\text{ам микр печь}} = \frac{15}{365} * 5000 * \frac{1}{5} = 41 \frac{\text{руб}}{\text{год}}$$

$$K_{\text{ам камера}} = \frac{15}{365} * 800000 * \frac{1}{5} = 6575 \frac{\text{руб}}{\text{год}}$$

$$K_{\text{ам наг воз}} = \frac{15}{365} * 30000 * \frac{1}{5} = 246 \frac{\text{руб}}{\text{год}}$$

Суммарные отчисления на амортизацию техники и оборудования:

$$\begin{aligned}
K_{\text{ам}} &= K_{\text{ам комп}} + K_{\text{ам печь}} + K_{\text{ам сикр печь}} + K_{\text{ам камера}} \\
&= 1046 + 3424 + 41 + 6575 \quad 246 = 11 \, 332 \frac{\text{руб}}{\text{год}}.
\end{aligned}$$

4.2.3 Затраты на заработную плату

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда).

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор. Базовый оклад Z_6 определяется исходя из размеров окладов, определенных штатным расписанием предприятия.

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент

Затраты на заработную плату рассчитываются:

$$K_{\text{з/пл}} = 3\Pi_{\text{инж}} + 3\Pi_{\text{пр}}, \text{ руб}$$

где ЗП инж – заработная плата инженера, руб;

ЗП нр - заработная плата научного руководителя, руб;

Месячный оклад:

$$\text{ЗП}_{\text{м.окл.инж/нр.}} = \text{ЗП}_{\text{инж/нр}} * K_1 * K_2, \text{ руб}$$

где $\text{ЗП}_{\text{м.окл.инж/нр}}$ - месячный оклад инженера, научного руководителя, руб;

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

K_2 – районный коэффициент, принимается равным 30%.

Тогда месячный оклад:

$$\text{ЗП}_{\text{м.окл.инж.}} = \text{ЗП}_{\text{инж/нр}} * K_1 * K_2 = 16\,300 * 1,1 * 1,3 = 23\,309 \text{ руб.}$$

$$\text{ЗП}_{\text{м.окл.нр.}} = \text{ЗП}_{\text{инж/нр}} * K_1 * K_2 = 39\,300 * 1,1 * 1,3 = 56\,199 \text{ руб.}$$

Фактическая заработная плата для инженера:

$$\text{ЗП ф. инж} = \frac{\text{ЗП м. инж}}{21} * n = \frac{23\,309}{21} * 107 = 118\,764 \text{ руб.}$$

Фактическая заработная плата для научного руководителя:

$$\text{ЗП ф. нр} = \frac{\text{ЗП м. инж}}{21} * n = \frac{56\,199}{21} * 7 = 18\,733 \text{ руб.}$$

Затраты на заработную плату:

$$K_{\text{з/пл}} = \text{ЗП}_{\text{ф.инж}} + \text{ЗП}_{\text{ф.нр}} = 118\,764 + 18\,733 = 137\,497 \text{ руб.}$$

4.2.4 Затраты на социальные отчисления

Отчисления на социальные нужды – обязательные отчисления по нормам, установленным законодательством государственного социального страхования в Фонд социального страхования РФ, Пенсионный фонд РФ, фонды обязательного медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, включаемых в себестоимость продукции (работ, услуг), по элементу «Затраты на оплату труда»

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

Тогда затраты на социальные отчисления определяются:

$$K_{c.o.} = 0,302 * K_{з/пл} = 0,302 * 137\,497 = 41\,524,09 \text{ руб.} \quad (3)$$

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.

$$K_{пр} = 0,1 * (K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{з/пл} + K_{c.o.}) = 0,1 * (2\,000 + 11\,086 + 137\,497 + 41\,524,09) = 19\,210,7 \text{ руб.}$$

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 20 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Тогда накладные расходы определяются как:

$$K_{\text{накл}} = 0,2 * K_{з/пл} = 0,2 * 137\,497 = 27\,499,4 \text{ руб} \quad (4)$$

Таблица 3 – Смета затрат

Элементы затрат	Стоимость, руб.
1. Материальные затраты	2 000
2. Амортизация компьютерной техники и оборудования	11 086
3. Затраты на заработную плату	137 497
4. Затраты на социальные нужды	41 524,09
5. Прочие затраты	19 210,7
6. Накладные затраты	27 499,4
Итого:	307 565,6 руб.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p \quad (5)$$

где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов; a_i – весовой коэффициент i -го параметра;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Таблица 4 - Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже.

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект Комбинированный нагрев (СВЧ)	Аналог 1 Кондуктивный нагрев	Аналог 2 Конвективный нагрев
1. Способствует сокращению времени задержки зажигания	0,1	5	3	4
2. Эффективная сушка древесной биомассы	0,15	4	2	3
3. Экологичность	0,15	5	3	3
4. Энергосбережение	0,20	3	3	3
5. Надежность	0,25	4	4	4
6. Материалоемкость	0,15	4	4	4

$$I_{\text{тп}}=5*0,1+4*0,15+5*0,15+3*0,2+4*0,25+5*0,05+4*0,01=3,74$$

$$\text{Аналог 1}=3*0,1+2*0,15+3*0,15+3*0,2+4*0,25+2*0,05+4*0,1=3,15$$

$$\text{Аналог 2}=4*0,1+3*0,15+3*0,15+3*0,2+4*0,25+4*0,05+4*0,1=3,5$$

Значение интегрального показателя ресурсоэффективности текущего проекта составил 3,74

Одним из преимуществ микроволнового зажигания является его способность быстро и эффективно воспламенять древесное биотопливо, что приводит к более эффективному процессу сгорания. Эта технология также

может уменьшить количество топлива, необходимого для сжигания, что может привести к значительной экономии средств.

Еще одним преимуществом сложного комбинированного зажигания является его способность уменьшать выбросы оксида азота, так как при использовании СВЧ оно поможет снизить время зажигания и также снижает температуру зажигания топлива. Эта технология производит меньше загрязняющих веществ, что является экологически безопасным и может помочь организациям достичь своих целей в области устойчивого развития. Кроме того, микроволновое зажигание может помочь снизить риск взрыва и других угроз безопасности, связанных с традиционными методами зажигания. Это связано с тем, что процесс зажигания лучше контролируется, что снижает риск отказа зажигания или других проблем, которые могут привести к несчастным случаям.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ14	Омарову Азимхану Адилхановичу

Зажигание частиц древесной биомассы, в условиях комбинированного радиационно-конвективно-микроволнового нагрева.


Школа	ИШЭ	Отделение(НОЦ)	НОЦ И.Н.Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: частица древесной биомассы. Область применения: результаты теоретического и экспериментального исследования могут стать базой при проектировании топочных устройств.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов Природа воздействия Действие на организм человека Нормы воздействия и нормативные документы (для вредных факторов) СИЗ коллективные и индивидуальные 1.2. Анализ выявленных опасных факторов : Электробезопасность Пожаробезопасности	1.1 Вредные факторы: 1.1.1. Недостаточная освещенность; 1.1.2. Нарушения микроклимата, оптимальные и допустимые параметры; 1.1.3 Шум, ПДУ, СКЗ, СИЗ; 1.1.4. Повышенный уровень электромагнитного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ; 1.2. Опасные факторы: 1.2.1. Электроопасность; класс электроопасности помещения, безопасные номиналы I, U, R _{заземления} , СКЗ, СИЗ; Приведен расчет освещения рабочего места; 1.2.2. Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения; Приведена схема эвакуации.
2. Экологическая безопасность: Выбросы в окружающую среду Решения по обеспечению экологической безопасности	Наличие промышленных отходов (бумага-черновики, пластмасса, перегоревшие люминесцентные лампы.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: 1. перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; 2. разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; 3. разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.	Рассмотрены 2 ситуации ЧС: 1) природная – сильные морозы зимой, (аварии на электро-, тепло-коммуникациях, водоканале, транспорте); 2) техногенная – несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место (возможны проявления вандализма, диверсии, промышленного шпионажа), представлены мероприятия по обеспечению устойчивой работы производства в том и другом случае.
4. Перечень нормативно-технической документации.	– ГОСТы, СанПиНы, СНиПы

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2023 г.
------------------------------------------------------	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ТПУ	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		28.04.2023 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ14			28.04.2023 г.

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

5.1 Введение

При проведении исследований в рамках магистерской диссертации изучались особенности процессов зажигания сложного комбинированного радиационно-конвективно-микроволнового нагрева древесного биотоплива при воздействии на него высокотемпературной среды. Объектом исследования является частицы древесного биотоплива – частицы кедра и сосны.

Исследования проводились с применением технологий теоретического и физического эксперимента. При проведении физического эксперимента были исследованы основные закономерности зажигания частиц, а также фиксировались времена задержки зажигания для различных температур среды. Результаты эксперимента позволили определить физический механизм зажигания частиц древесного биотоплива. Комбинированный нагрев с использованием сверх высоких частот позволило получить времена задержки за короткое время при различных параметрах высокотемпературной среды. Поскольку основная задача исследований заключалась в получении теоретических и экспериментальных данных.

Несомненно, проведение любого научного исследования влечёт за собой вопрос о его актуальности, социальной значимости и ответственности. В данном случае применение результатов исследования поможет при проектировании топочных устройств, работающих по технологии циркулирующего кипящего слоя. Однако необходимо учитывать и угрозы, возникающие для человека непосредственно при проведении исследования. Цель данного раздела оценка возможных факторов риска и методов их предотвращения при проведении исследования.

В данном разделе будут проанализированы особенности обеспечения правовой и производственной безопасности исследователя, а также рассмотрены

вопросы экологической безопасности и безопасности в чрезвычайных ситуациях.

5.2 Производственная безопасность

Исследование теплопереноса при воспламенении типичного лесного горючего материала в высокотемпературной среде в основном связано с моделированием, то есть работа ведется за персональным компьютером, из-за чего могут возникнуть различные факторы, влияющие на жизнь и здоровье человека.

Обеспечение комфортных условий труда особенно влияют на производительность труда и снижение профессиональных заболеваний. К ним относятся меры, связанные с исключением травматизма, антисанитарии и возгораний.

Рассмотрим подробнее выявленные факторы и мероприятия по снижению их воздействия.

5.3 Вредные факторы

В рамках данного раздела проанализируем основные особенности и влияние вредных производственных факторов на человека, выполняющего работу над проектом. К таким факторам относятся:

5.3.1 Недостаточная освещенность

Для обеспечения требуемой освещенности необходимо использовать совмещенное освещение, создаваемое сочетанием естественного и искусственного освещения. При данном этапе развития осветительной техники целесообразно использовать люминесцентные лампы, которые по сравнению с лампами накаливания имеют большую светоотдачу на ватт потребляемой мощности и более естественный спектр.

Минимальный уровень средней освещенности на рабочих местах с постоянным пребыванием людей должен быть не менее 200 лк.

В расчётном задании должны быть решены следующие вопросы:

- выбор системы освещения;
- выбор источников света;
- выбор светильников и их размещение;
- выбор нормируемой освещённости;
- расчёт освещения методом светового потока.

В данном расчётном задании для всех помещений рассчитывается общее равномерное освещение.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен.

Световой поток лампы определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{рас}} = E_{\text{н}} * S * K_3 * Z/N * \eta \quad (1.5.1)$$

Где $E_{\text{н}}$ – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05- 95, лк; S – площадь освещаемого помещения, м²; K_3 – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, свето-технической арматуры, стен и пр., т. е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли (табл. 4.9); Z – коэффициент неравномерности освещения, отношение $E_{\text{ср}}/E_{\text{min}}$. Для люминесцентных ламп

при расчётах берётся равным 1,1; N – число ламп в помещении; η – коэффициент использования светового потока.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен $\rho_{\text{с}}$ и потолка $\rho_{\text{п}}$.

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = S / h(A + B) \quad (1.5.2)$$

Проведем расчет индекса помещения:

Площадь помещения:

$$S = A * B = 12 * 10 = 120 \text{ м}^2$$

Индекс:

$$i = \frac{S}{h * (A + B)} = \frac{120}{2.35 * (12 + 10)} = 2.32$$

Согласно этим данным коэффициент использования светового потока будет равен 56 % или в долях = 0,56.

Коэффициенты отражения оцениваются субъективно (табл. 4.10) [БЖД Практикум 2009-2020].

Согласно указанной методике выбираем тип источника света.

Наиболее подходящим вариантом является 40 ваттная лампа ЛБ, у которой $\Phi=2800$ лм. Для выбранного типа лампы подходит светильник ОД-2-40 с размерами: длина = 1230 мм, ширина = 266 мм.

Из уравнения 1.5.1 находим количество ламп для помещения

$$N = E_H * S * K_3 * Z / \Phi * \eta = 200 * 120 * 1,3 * 1,1 / 2800 * 0,56 = 21,875;$$

Принимаем $N=24$ лампы или 12 светильников..

Размещаем светильники в 3 ряда по 4 светильника в ряду с соблюдением условий: L – расстояние между соседними светильниками или рядами (если по длине (А) и ширине (В) помещения расстояния различны, то они обозначаются L_A и L_B),

L – расстояние между соседними светильниками или рядами (если по длине (А) и ширине (В) помещения расстояния различны, то они обозначаются L_A и L_B),

l – расстояние от крайних светильников или рядов до стены.

Оптимальное расстояние l от крайнего ряда светильников до стены рекомендуется принимать равным $L/3$.

Сначала определим световой поток расчетный.

$$\Phi = E_H * S * K_3 * Z / \eta = 200 * 120 * 1,3 * 1,1 / 24 * 0,56 = 2554 \text{ лм};$$

Проведем проверку выполнения условия соответствия:

$$- 10\% \leq ((\Phi_{\text{расч}} - \Phi_{\text{станд}})/\Phi_{\text{расч}})*100\% \leq + 20\%$$

Подставляя численные значения получаем:

$$- 10\% \leq (2800 - 2554)/2554 * 100\% \leq + 20\%$$

$$- 10\% \leq +9,6\% \leq + 20\%$$

Результат расчета укладывается в допустимые пределы.

Определим мощность осветительной установки:

$$P = N * P_i = 24 * 40 \text{ Вт} = 960 \text{ Вт.}$$

Теперь определим расстояния между светильниками по длине и ширине помещения.

$$12000 = 3 * L_A + 4 * 1230 + 2/3 * L_A; L_A = (12000 - 4920) * 3/11 = 1930 \text{ мм};$$

$$L_A/3 = 644 \text{ мм};$$

$$10000 = 2 * L_B + 3 * 266 + 2/3 * L_B; L_B = (10000 - 798) * 3/8 = 3450 \text{ мм};$$

$$L_B/3 = 1150 \text{ мм.}$$

Рисуем схему размещения светильников на потолке для обеспечения общего равномерного освещения.

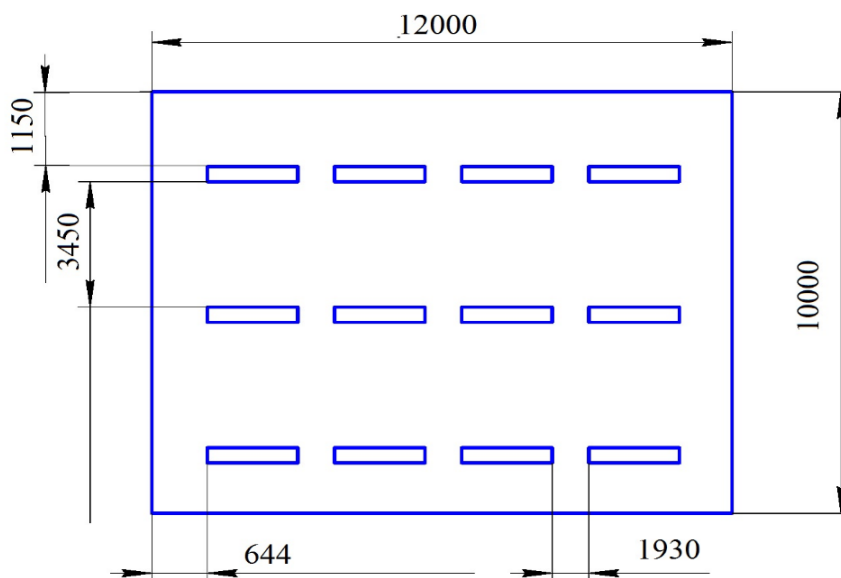


Рисунок 1 - План размещения светильников на потолке.

Проведем проверку выполнения условия соответствия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} * 100\% \leq +20\%$$

Подставляя численные значения получаем:

$$+10\% \leq$$

$$-10\% \leq 3,58\% \leq +20\%$$

Результат расчета укладывается в поле допуска.

Определим мощность осветительной установки:

$$P = N_l * P_l = 40 * 80 = 3200 \text{ Вт}$$

5.3.2 Нарушение микроклимата оптимальные и допустимые параметры.

Проанализируем микроклимат в помещении, где находится рабочее место. Микроклимат производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Эти факторы влияют на организм человека, определяя его самочувствие.

Оптимальные и допустимые значения параметров микроклимата приведены в таблице 1 и 2

Таблица 1 - Оптимальные нормы микроклимата

Период года	Температура воздуха, С°	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	19-23	40-60	0.1
Теплый	23-25		0.2

Таблица 2 - Допустимые нормы микроклимата

Период года	Температура воздуха, С°	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с

	Нижняя допустимая граница	Верхняя допустимая граница		
Холодный	15	24	20-80	<0.5
Теплый	22	28	20-80	<0.5

Общая площадь рабочего помещения составляет 42м^2 , объем составляет 147м^3 . По СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 санитарные нормы составляют $6,5\text{ м}^2$ и 20 м^3 объема на одного человека. Исходя из приведенных выше данных, можно сказать, что количество рабочих мест соответствует размерам помещения по санитарным нормам.

После анализа габаритных размеров рассмотрим микроклимат в этой комнате. В качестве параметров микроклимата рассмотрим температуру, влажность воздуха, скорость ветра.

В помещении осуществляется естественная вентиляция посредством наличия легко открываемого оконного проема (форточки), а также дверного проема. По зоне действия такая вентиляция является общеобменной. Основным недостатком - приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания. Согласно нормам СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 объем воздуха необходимый на одного человека в помещении без дополнительной вентиляции должен быть более 40м^3 [1]. В нашем случае объем воздуха на одного человека составляет 42 м^3 , из этого следует, что дополнительная вентиляция не требуется. Параметры микроклимата поддерживаются в холодное время года за счет систем водяного отопления с нагревом воды до 100°C , а в теплое время года – за счет кондиционирования, с параметрами согласно. Нормируемые параметры микроклимата, ионного состава воздуха, содержания вредных веществ должны соответствовать требованиям [2].

5.3.3 Повышенный уровень шума

Одним из наиболее распространенных в производстве вредных факторов

является шум. Он создается вентиляционным и рабочим оборудованием, преобразователями напряжения, рабочими лампами дневного света, а также проникает снаружи. Шум вызывает головную боль, усталость, бессонницу или сонливость, ослабляет внимание, память ухудшается, реакция уменьшается.

Основным источником шума в комнате являются компьютерные охлаждающие вентиляторы и. Уровень шума варьируется от 35 до 42 дБА. Согласно СанПиН 2.2.2 / 2.4.1340-03, при выполнении основных работ на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 82 дБА [5].

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства индивидуальной защиты(СИЗ) и средства коллективной защиты (СКЗ) от шума.

Средства коллективной защиты:

1. устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
2. изоляция источников шума от окружающей среды (применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов, например любой пористый материал – шамотный кирпич, микропористая резина, поролон и др.);
3. применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения;

Средства индивидуальной защиты;

1. применение спецодежды и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

5.3.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ

Источником электромагнитных излучений в нашем случае являются дисплеи ПЭВМ. Монитор компьютера включает в себя излучения рентгеновской, ультрафиолетовой и инфракрасной области, а также широкий диапазон электромагнитных волн других частот. Согласно СанПиН

2.2.2/2.4.1340-03 напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на расстоянии 50 см вокруг ВДТ не должна превышать 25В/м в диапазоне от 5Гц до 2кГц, 2,5В/м в диапазоне от 2 до 400кГц [3]. Плотность магнитного потока не должна превышать в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц 250нТл, и 25нТл в диапазоне от 2 до 400кГц. Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать 500В [3]. В ходе работы использовалась ПЭВМ типа Acer VN7-791 со следующими характеристиками: напряженность электромагнитного поля 2,5В/м; поверхностный потенциал составляет 450 В [4].

При длительном постоянном воздействии электромагнитного поля (ЭМП) радиочастотного диапазона при работе на ПЭВМ у человеческого организма сердечно-сосудистые, респираторные и нервные расстройства, головные боли, усталость, ухудшение состояния здоровья, гипотония, изменения сердечной мышцы проводимости. Тепловой эффект ЭМП характеризуется увеличением температуры тела, локальным селективным нагревом тканей, органов, клеток за счет перехода ЭМП на теплую энергию.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) облучения (по *ОСТ 54 30013-83*):

- а) до 10 мкВт./см² , время работы (8 часов);
- б) от 10 до 100 мкВт/см² , время работы не более 2 часов;
- в) от 100 до 1000 мкВт/см² , время работы не более 20 мин. при условии пользования защитными очками;
- г) для населения в целом ППМ не должен превышать 1 мкВт/см².

Защита человека от опасного воздействия электромагнитного излучения осуществляется следующими способами:

СКЗ

1. защита временем;
2. защита расстоянием;
3. снижение интенсивности излучения непосредственно в самом источнике излучения;
4. заземление экрана вокруг источника;

5. защита рабочего места от излучения;

СИЗ

1. Очки и специальная одежда, выполненная из металлизированной ткани (кольчуга). При этом следует отметить, что использование СИЗ возможно при кратковременных работах и является мерой аварийного характера. Ежедневная защита обслуживающего персонала должна обеспечиваться другими средствами.

2. Вместо обычных стекол используют стекла, покрытые тонким слоем золота или диоксида олова (SnO_2).

5.4 Анализ опасных производственных факторов

5.4.1 Электробезопасность.

К опасным факторам можно отнести наличие в помещении большого количества аппаратуры, использующей однофазный электрический ток напряжением 220 В и частотой 50 Гц. По опасности электропоражения комната относится к помещениям без повышенной опасности, так как отсутствует повышенная влажность, высокая температура, токопроводящая пыль и возможность одновременного сприкосновения токоведущих элементов с заземленными металлическими корпусами оборудования [6].

Лаборатория относится к помещению без повышенной опасности поражения электрическим током. Безопасными номиналами являются: $I < 0,1$ А; $U < (2-36)$ В; $R_{\text{зазем}} < 4$ Ом.

Для защиты от поражения электрическим током используют СИЗ и СКЗ.

Средства коллективной защиты:

1. — защитное заземление, зануление;
2. — малое напряжение;
3. — электрическое разделение сетей;
4. — защитное отключение;
5. — изоляция токоведущих частей;

6. — оградительные устройства.

7. Использование щитов, барьеров, клеток, ширм, а также заземляющих и шунтирующих штанг, специальных знаков и плакатов.

Средства индивидуальной защиты:

1. Использование диэлектрических перчаток, изолирующих клещей и штанг, слесарных инструментов с изолированными рукоятками, указатели величины напряжения, калоши, боты, подставки и коврики.

Для защиты человека от прямого прикосновения к токоведущим частям, согласно [6] применяется изоляция токоведущих частей, установка ограждений и оболочек, применение барьеров, размещение вне зоны досягаемости, устройства защитного отключения (УЗО). Для защиты от косвенного прикосновения применяются защитное заземление и защитное зануление [6].

При поражении человека электрическим током необходимо освободить пострадавшего от его воздействия. Далее пострадавший должен быть осмотрен врачом с заключением о состоянии здоровья, при его нормальном самочувствии.

В случае если пострадавшего невозможно быстро отключить от вредного воздействия, освобождение от электричества пострадавшего необходимо производить, изолировав себя диэлектрическими перчатками или галошами. При необходимости перерезать провода (каждый в отдельности) инструментом с изолированными ручками. Если есть необходимость (при потере сознания, остановке сердца и т.п.) оказания первой помощи, то до прибытия медработника необходимо начать делать наружный массаж сердца, искусственное дыхание.

Чрезмерно высокая температура объекта, способная вызвать ожоги тканей организма человека.

5.4.2 Пожаробезопасность.

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д.

Согласно НПБ 105-03 лаборатория относится к категории В– горючие и трудно горючие жидкости, твердые горючие и трудно горючие вещества и

материалы, вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых находится, не относятся к категории наиболее опасных А или Б.

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 2.01.02-85 (выполнено из кирпича, которое относится к трудносгораемым материалам).

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера:

а) халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня);

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды [7].

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000В. Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например ОП-5.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

Для предупреждения пожара и взрыва необходимо предусмотреть:

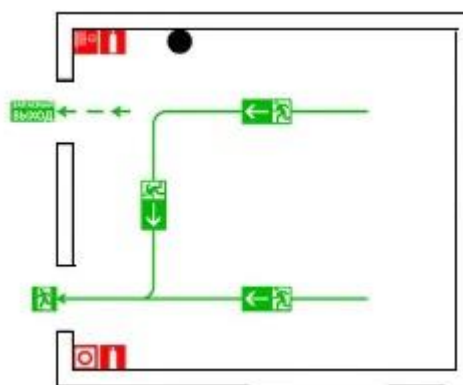
1. специальные изолированные помещения для хранения и разлива легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), оборудованные приточно-вытяжной вентиляцией во взрывобезопасном исполнении - соответствии с ГОСТ 12.4.021-75 и СНиП 2.04.05-86;

2. специальные помещения (для хранения в таре пылеобразной канифоли), изолированные от нагревательных приборов и нагретых частей оборудования;

3. первичные средства пожаротушения на производственных участках (передвижные углекислые огнетушители ГОСТ 9230-77, пенные огнетушители ТУ 22-4720-80, ящики с песком, войлок, кошма или асбестовое полотно);

4. автоматические сигнализаторы (типа СВК-3 М 1) для сигнализации о присутствии в воздухе помещений предвзрывных концентраций горючих паров растворителей и их смесей.

Лаборатория полностью соответствует требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, изображенного на рисунке 2, порошковых огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу.



У С Л О В Н Ы Е О Б О З Н А Ч Е Н И Я

	- вы находитесь здесь		- огнетушитель		- аптечка первой медицинской помощи		- направление движения к выходу
	- электрощит		- пожарный кран		- эвакуационный выход		- направление движения к эвакуационному выходу
	- кнопка включения установок (систем) пожарной автоматики		- телефон		- запасный выход		- направление движения к запасному выходу

Рисунок 2 - План эвакуации.

Все помещения лаборатории должны соответствовать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ и иметь средства пожаротушения.

Лаборатория должна быть оснащена пожарными кранами (не менее одного на этаж) с пожарными рукавами. В каждом рабочем помещении должны быть в наличии огнетушители и песок, а в помещениях с огнеопасными и легковоспламеняющимися веществами - дополнительные средства пожаротушения.

В помещении лаборатории на видном месте должен быть вывешен план эвакуации сотрудников в случае возникновения пожара.

Распоряжением по лаборатории из числа сотрудников назначается группа (3 - 5 человек), которая организует все противопожарные мероприятия, получив инструктаж местной пожарной команды.

Все сотрудники лаборатории должны быть обучены правилам обращения с огне- и взрывоопасными веществами, газовыми приборами, а также должны уметь обращаться с противогазом, огнетушителем и другими средствами пожаротушения, имеющимися в лаборатории.

В помещениях лаборатории и в непосредственной близости от них (в коридорах, под лестницами) запрещается хранить горючие материалы и устанавливать предметы, загромождающие проходы и доступ к средствам пожаротушения.

Курить в помещениях лаборатории строго запрещается!

Без разрешения начальника лаборатории и лица, ответственного за противопожарные мероприятия, запрещается установка лабораторных и нагревательных приборов, пуск их в эксплуатацию, переделка электропроводки.

Все нагревательные приборы должны быть установлены на термоизолирующих подставках [7].

Запрещается эксплуатация неисправных лабораторных и нагревательных приборов.

После окончания работы необходимо отключить электроэнергию, газ и воду во всех помещениях.

Каждый сотрудник лаборатории, заметивший пожар, задымление или другие признаки пожара обязан:

- немедленно вызвать пожарную часть по телефону;
- принять меры по ограничению распространения огня и ликвидации пожара;
- поставить в известность начальника лаборатории, который в свою очередь должен известить сотрудников, принять меры к их эвакуации и ликвидации пожара.

5.5 Экологическая безопасность

В компьютерах огромное количество компонентов, которые содержат токсичные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды.

К таким веществам относятся:

- свинец (накапливается в организме, поражая почки, нервную систему);
- ртуть (поражает мозг и нервную систему);
- никель и цинк (могут вызывать дерматит);
- щелочи (прожигают слизистые оболочки и кожу);

Поэтому компьютер требует специальных комплексных методов утилизации.

Таким образом утилизацию компьютера можно провести следующим образом:

- пластмассовые изделия (крупногабаритные) измельчить для уменьшения объема;
- копир-порошок упаковать в отдельную упаковку, точно также, как и все проклассифицированные и измельченные компоненты оргтехники, и после

накопления на складе транспортных количеств отправить предприятиям и фирмам, специализирующимся по переработке отдельных видов материалов.

Люминесцентные лампы утилизируют следующим образом [8]. Не работающие лампы немедленно после удаления из светильника должны быть упакованы в картонную коробку, бумагу или тонкий мягкий картон, предохраняющий лампы от взаимного соприкосновения и случайного механического повреждения. После накопления ламп объемом в 1 транспортную единицу их сдают на переработку на соответствующее предприятие. Недопустимо выбрасывать отработанные энергосберегающие лампы вместе с обычным мусором, превращая его в ртутьсодержащие отходы, которые загрязняют ртутными парами. Бумага – черновик утилизируется с помощью шредера (измельчитель) офисное устройство для измельчения бумаги в очень мелкие полоски или крошечные кусочки, затем прессуется и вывозится.

3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Природная чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории или акватории, сложившейся в результате возникновения источника природной чрезвычайной ситуации, который может повлечь или повлек за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей и (или) окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Производство находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют.

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия.

Для Сибири в зимнее время года характерны морозы. Достижение критически низких температур приводит к авариям систем тепло и водоснабжения, сантехнических коммуникаций и электроснабжения,

приостановке работы. В этом случае при подготовке к зиме следует предусмотреть а) газобаллонные калориферы (запасные обогреватели), б) дизель или бензоэлектростанции; в) запасы питьевой и технической воды на складе (не менее 30 л на 1 человека); г) теплый транспорт для доставки работников на работу и с работы домой в случае отказа муниципального транспорта. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.

В лаборатории наиболее вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что применение дополнительных СВЧ-воздействий значительно ускоряет и стабилизирует процессы горения и сгорания частиц древесины. При этом было установлено, что наибольшее влияние от использования СВЧ-подсветки топлива в процессе горения достигается в условиях низкотемпературного нагрева. Таким образом, микроволновая энергетика позволяет создавать топки для сжигания топлива при более низких температурах, значение которых ниже уровня образования оксидов серы и азота.

По результатам проведенных экспериментов установлено, что эффективность микроволнового воздействия возрастает при зажигании влагонасыщенной биомассы. Последнее создает предпосылки возможности сжигания влажной (без проведения процедуры предварительной термической подготовки - сушки) древесной биомассы в топочных устройствах. При этом, как установлено по результатам теоретических и экспериментальных исследований, сжигание влагонасыщенных топлив приводит к значительному секвестрованию оксидов серы и азота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fouquet R., Hippe R. Twin transitions of decarbonisation and digitalisation: A historical perspective on energy and information in European economies // *Energy Research & Social Science*. – 2022. – V. 91. – 102736.
2. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration / A. Alem Kebede, Th. Kalogiannis, J. van Mierlo, M. Berecibar // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – V. 159. – 112213.
3. A review on energy storage devices based on rylene imide dyes: Synthesis, applications and challenges / M.R. Biradar, S.V. Bhosale, P.P. Morajakar, Sh.V. Bhosale // *Fuel*. – 2022. – V. 310. – 122487.
4. Груздев А.И. Состояние, проблемы и направления развития современных накопителей электрической энергии // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. – 2008. – № 7. – С. 116–124.
5. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems / Liangzhong Yao, Bo Yang, Hongfen Cui, Jun Zhuang, Jilei Ye, Jinhua Xue // *J. Mod. Power Syst // Clean Energy*. – 2016. – V. 4 (4). – P. 519–528.
6. Perdana S., Vielle M., Schenckery M. European Economic impacts of cutting energy imports from Russia: A computable general equilibrium analysis // *Energy Strategy Reviews*. – 2022. – V. 44. – 101006.
7. Wood burning: a major source of volatile organic compounds during winter time in the Paris region / B. Languille, V. Gros, J.-E. Petit, C. Honoré, A. Baudic, O. Perrussel, G. Foret, V. Michoud, F. Truong, N. Bonnaire, R. Sarda-Estève, M. Delmotte, A. Feron, F. Maisonneuve, C. Gaimoz, P. Formenti, S. Kotthaus, M. Haeffelin, O. Favez // *Science of the Total Environment*. – 2020. – V. 711. – 135055.
8. Biomass transport for energy: cost, energy and CO₂ performance of forest wood and manure transport chains in Switzerland / V. Schnorf, E. Trutnevyte, G. Bowman, V. Burg // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – V. 293. – 125971.

9. Simonsen M., Kjønås O.J., Aal C. Substitution of fossil-energy intensive building materials by wood products – does it matter? A case study from Western Norway // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – V. 383. – 134941.

10. Increasing extracellular cellulase activity of the recombinant *Saccharomyces cerevisiae* by engineering cell wall-related proteins for improved consolidated processing of carbon neutral lignocellulosic biomass / Jie Li, Yu Zeng, Wei-Bin Wang, Qing-Qing Wan, Chen-Guang Liu, Riaan den Haan, Willem H van Zyl, Xin-Qing Zhao // *Bioresource Technology*. – 2022. – V. 365. – 128132.

11. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment / D.K. Shen, S. Gu, K.H. Luo, A.V. Bridgwater, M.X. Fang // *Fuel*. – 2009. – V. 88. – 1024.

12. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels / E. Rokni, X. Ren, A. Panahi, Y.A. Levendis // *Fuel*. – 2018. – V. 211. – P. 363–374.

13. Yilgin M., Pehlivan D.D. Volatiles and char combustion rates of demineralized lignite and wood blends // *Applied Energy*. – 2009. – V. 86. – P. 1179.

14. Haykiri-Acma H., Yaman S. Combinations of synergistic interactions and additive behavior during the co-oxidation of chars from lignite and biomass // *Fuel Processing Technology*. – 2008. – V. 89. – P. 176–182.

15. Haykiri-Acma H., Yaman S. Effect of co-combustion on the burn out of lignite/ biomass blends: a Turkish case study // *Waste Manag.* – 2008. – V. 28. – P. 2077–2084.

16. Левин Э.Д., Репях С.М. Переработка древесной зелени. – М.: Изд-во «Наука», 1984. – 120 с.

17. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1990. – 336 с.

18. Косторева Ж.А., Малышев Д.Ю., Сыродой С.В. Определение условий и характеристик зажигания частиц влажной древесины для повышения ресурсоэффективности теплоэнергетики // *Известия Томского*

политехнического университета Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 97–105.

19. Финкер Ф.З., Капица Д.В., Кубышкин И.Б. От вихревой топки до ВИР-сжигания // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2011. – № 1. – С. 309–317.

20. Математическое моделирование распространения электромагнитного импульса в твердотопливной энергетической установке / А.С. Воронцов, М.Б. Марков, Ю.М. Милёхин, Д.Н. Садовничий. – М.: Федеральный центр двойных технологий «Союз», Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2010. – С. 1–17.

21. Лебедев П.Д. Сушка инфракрасными лучами. – М.: Изд-во «Наука», 1953. – 232 с.

22. Милёхин Ю.М., Садовничий Д.Н., Гусев С.А. Электризация твердотопливных энергетических установок при воздействии ионизирующего излучения // Сб. трудов «Физика экстремальных состояний вещества-2006» / под ред. акад. В.Е. Фортова. – Черногоровка: Институт проблем химической физики РАН, 2006. – С. 163–164.

23. Гареев Ф.Х. Проблемы и перспективы СВЧ-сушки древесины // Лесная промышленность. – 2004. – Т. 14. – № 1. – С. 50–53.

24. Шубин Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1973. – 248 с.

25. Галкин В.П. Древесиноведческие аспекты инновационной технологии сушки древесины: монография. – М.: Изд-во ГОУ ВПО «МГУЛ», 2010. – 238 с.

26. Ignition and combustion characteristics of coal - water fuels based on coal & semi-coke / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, V.V. Salomatov, D.Y. Malyshev, Z.A. Kostoreva, M.V. Purin, S.A. Yankovsky // Combustion and Flame. – 2022. – V. 246. – 112430.

27. A comparative analysis of the characteristics of the water removal processes in preparation for incineration of typical wood waste and forest combustible

materials / G.V. Kuznetsov, N.A. Nigay, S.V. Syrodoy, N.Yu Gutareva, D.Yu Malyshev // Energy. – 2022. – V. 239. – 122362.

28. Саломатов В.В., Сладков С.О., Пащенко С.Э. СВЧ-технологии в угольной энергетике // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 85. – № 3. – С. 535–549.

29. Брандт Л.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Физматгиз, 1963. – 404 с.

30. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. – М.: Изд-во ИЛ, 1960. – 438 с.

31. Хайдурова А.А. Улучшение качественных характеристик твердого топлива воздействием микроволновой энергии при его подготовке к сжиганию: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Улан-Удэ, 2010. – 17 с.

32. СВЧ-энергетика Теория и практика/ А.Н. Диденко; Я.Б.Данилевич.- М.: Наука, 2003. – 446с.

33. Кизина О.А., Адамович А.Л. Анализ современных методов и оборудования для сушки древесины // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В. – 2011.

34. Японская ассоциация по сохранению древесины. "Разработка соответствующей системы восстановления и обработки путем переработки и сжигания древесных отходов, включая древесину, обработанную для консервации". 2001.

35. Хамид, М. (1992), "Основной принцип нагрева микроволновой энергией", Теплопередача Инженерия, том 13, № 4, стр. 73-84

36. Арашкевич, М., Козиол, А; Оскварек, А, Лупински (2004), "Микроволновая сушка пористых материалов", Технология сушки, Том 22 (10), стр. 2331-2341

37. Барри, Уиллс А (1992), Технология переработки полезных ископаемых, стр. 217-229

38. Болдор, Д., Сандерс, Т.Х., Шварцель, К.Р. и Фаркас, Б.Э. (2005), "Модель для распределение температуры и влажности при непрерывной микроволновой сушке", Journal of food engineering, том 28, стр. 68-97

39. Хак, К. Э. (1999), "Микроволновая энергия для процессов обогащения полезных ископаемых – краткий обзор", International journal of mineral processing, том 57, стр. 1-24
40. Хартнетт, Дж.П. (1999), "Достижения в области теплопередачи", том 33, стр. 64
41. Гунасекаран, С. (1999), "Импульсная микроволново-вакуумная сушка пищевых материалов", Технология сушки, Том 17 (3), стр. 395-412
42. Хатчон Р.М., Де Йонг М.С. и Адамс Ф.П. (1992), "Система для быстрого Измерение радиочастотных и микроволновых свойств до 1400°C", Журнал Мощность СВЧ и электромагнитная энергия, Том 27 (2), стр. 87-92
43. Seyhun N., Ramaswany H., Sumnu G., Ahmed J. Comparison and modeling of microvave tempering and infrared assisted microwave tempering of frozen potato puree.// Journal of Foof Engineering 92. 2009. 339-344
44. Кузнецов М. И. Основы электротехники: учеб. пособие-10-е изд., перераб. - М.: Высшая школа, 1970
45. Анненков Ю.М. Основы электротехнологий: учеб. пособие. - Томск: Изд-во ТПУ, 2005. - 208 с
46. Щербаченко Л.А. Физика диэлектриков: курс лекций -Иркутск: Изд-во ИГУ, 2005. - 78 с
47. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А.В. Нетушил[и др.]. - 2-е изд., перераб. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. - 480 с
48. Хайдурова А.А. и др. Микроволновая сушка бурых углей и повышение их технологических характеристик // Изв. ВУЗов. Проблемы энергетики. – Казань: Изд-во КГЭУ. – 2010. – № 1-2. – С. 31-35
49. Хайдурова А.А. и др. Воздействие микроволновой энергии на бурый уголь для улучшения его технологических характеристик // Теплофизические основы энергетических технологий. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2009. – С. 109-113
50. James Graham, Senior Process Engineer. Microwaves for coal quality improvement: the DRYCOL Project. SACPS/International Pittsbrugh Coal Conference 2007 Johannesburg, South Africa, September 10-14, 2007

51. Алтухов И.В., Очиров В.Д. Анализ способов сушки // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. -2009.- № 36. -С. 16-21
52. Ченг, У.М., Рагхаван, Г.С.В., Нгади, М., Ванг, Н., (2006), "Стратегии регулирования мощности СВЧ в процессе сушки II.Микроволновая / воздушная сушка с фазовым управлением и циклическим управлением:", Journal of Food Engineering, том 76, стр. 195-201
53. Дипроз, Ф.М. (2001), "Некоторые соображения при использовании микроволновой печи в качестве инструмента лабораторных исследований", "Растения и почва", том 229, стр. 271-280
54. Лестер, Э. и Кингман, С.У. (2004), "Эффект предварительного нагрева в микроволновой печи на пяти различных углях", Топливо, том 83, стр. 1941-1947)
55. Лестер, Э. и Кингман, С.У. (2004), "Влияние микроволнового нагрева на физические и петрографические характеристики угля Великобритании", Энергетика и топливо, том 18,стр. 140-147
56. Кингман, С. У. и Роусон, Н.А. (1998), "Микроволновая обработка минералов – это Обзор", Minerals Engineering, том 11(11). стр. 1081-1087
57. Хайдурова А.А. 2006 Энергосберегающая технология сушки угольного концентрата для ТЭЦ. Издательство Иркутского государственного технического университета с 419-421
58. Хайдурова А А 2007 Воздействие микроволновой энергии на бурый уголь с целью улучшения его технических характеристик Издательство Иркутского государственного технического университета р 109-11
59. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»
60. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
61. ГОСТ 54 30013-83 Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности

62. ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010 – 76. Основы противопожарной защиты предприятий. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.

63. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.

64. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

65. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.

66. ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности

68. ГОСТ 30775-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов. Seyhun N., Ramaswany H., Sumnu G., Ahmed J. Comparison and modeling of microwave tempering and infrared assisted microwave tempering of frozen potato puree.// Journal of Food Engineering 92. 2009. 339-344

69 Chemkhi S., Zagrouba F., Bellagi A. Modeling and simulation of drying phenomena with rheological behavior.// Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2005. V22. №2. pp. 153-163

70 Kolomeitsev V.A. Microwave systems with uniform volumetric heating / V.A. Kolomeitsev, V.V. Komarov.-Saratov: Publishing house of SSTU, 1998.-160p

71 Chemkhi S., Zagrouba F., Bellagi A. Modeling and simulation of drying phenomena with rheological behavior.// Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2005. V22. №2. pp. 153-163

72 Коломейцев В.А. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом /В.А.Коломейцев, В.В.Комаров.-Саратов: Изд-во СГТУ,1998.-160с

73 Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны/ -М.:Изд-во ИЛ,1960.-438с

74 Коломейцев В.А. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом /В.А.Коломейцев, В.В.Комаров.-Саратов: Изд-во СГТУ,1998.-160с

75 Деккер А. Физика электротехнических материалов / А. Деккер. - М.-

Л.: Госэнергоиздат, 1962. - 256 с

76 Егоров Н.Ю. Публичная библиотека в системе непрерывного информационного образования: автореф. дис. канд. тех. наук / Егоров Никита Юрьевич; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – Санкт-Петербург, 2007. – 44с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Ignition of wood biomass particles, under conditions of combined radiation and convection-microwave heating

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ14	Омаров Азимхан Адилханович		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова	Сыродой Семен Владимирович	к.ф.-м.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Воробьева Виктория Владимировна	к.ф.н.		

Introduction

In the experiments we used particles of wood biomass, cut from a monolithic dry wood fragment (pine) of large sizes, the humidity of which was 5-8%. Subsequently, using a grinding and milling device, the surface of the particles was prepared and given the appropriate shape (cube). The process of ignition of particles of wood biomass with characteristic sizes $d = 3$ mm was studied.

When selecting the characteristic size of the particles the need to burn dispersed wood in furnaces of steam and hot-water boilers was taken into account. The simplest use of wood biomass is sawmill and wood processing waste (sawdust). The characteristic size of particles formed after wood sawing depends on the size of saw teeth and is in sawing conditions from 0.5 mm to 2 mm for the most widely used softwood. In conditions of low-temperature heating (during the period of start of the boiler unit in operation) the ignition delay time of such particles is from 1 to 20 seconds, depending on the moisture content of fuel. It can be said that the possible large values of t_{ign} significantly complicate the design of furnace devices of boiler units. Accordingly, it makes sense to design such combustion chambers, in which the intensification of heating of fuel particles is provided by illumination of the fuel flame, for example, by means of UHF (Ultra High Frequencies)[1].

Of importance for practice are also experimental data on the ignition delay times of groups of relatively large (3-6 mm) particles, which are formed under crushing wood (not business) intended for use as fuel (or an additive to the main fuel of large and small power boiler plants). For these reasons, experiments were conducted with wood particles, the characteristic size of which was 3.0 mm.

Experimental setup and technique

During the master's research an experimental study of wood biofuel combustion in a high-temperature environment was carried out. Samples were collected in the Timiryazevsk forestry of Tomsk region. Also in the forest were such species as pine, larch, and cedar. Therefore, in this case, it is legitimate to consider the collected samples as typical for this mixed forest area.

To assess the effect of heating conditions and ignition characteristics, experimental studies were performed on three experimental setups that differ significantly (in terms of heating conditions).

The first group of experiments was performed on the experimental stand shown in Fig. 1, which is similar to the installation [1] in terms of the principle of forming heating conditions, methods of recording the ignition processes, and processing of experimental results. The simulator shown in Fig. 1 reproduces the processes of heat and mass transfer occurring during ignition of fuel particles under conditions of predominantly radiation heating. The main part of the experimental stand is a hollow ceramic cylinder filled with air. An electric heater was attached to the outer surface of the ceramic cylinder. The whole heating system was placed in a thermally insulated casing, mounted on a movable carriage. The Photron FASTCAM CA4 5 high-speed video camera (video shooting speed up to 20 000 frames per second) was fixed on the same carriage. The carriage was mounted on rails. In order to prevent heat losses, the ends of the hollow cylinder were closed with special heat insulating flaps.

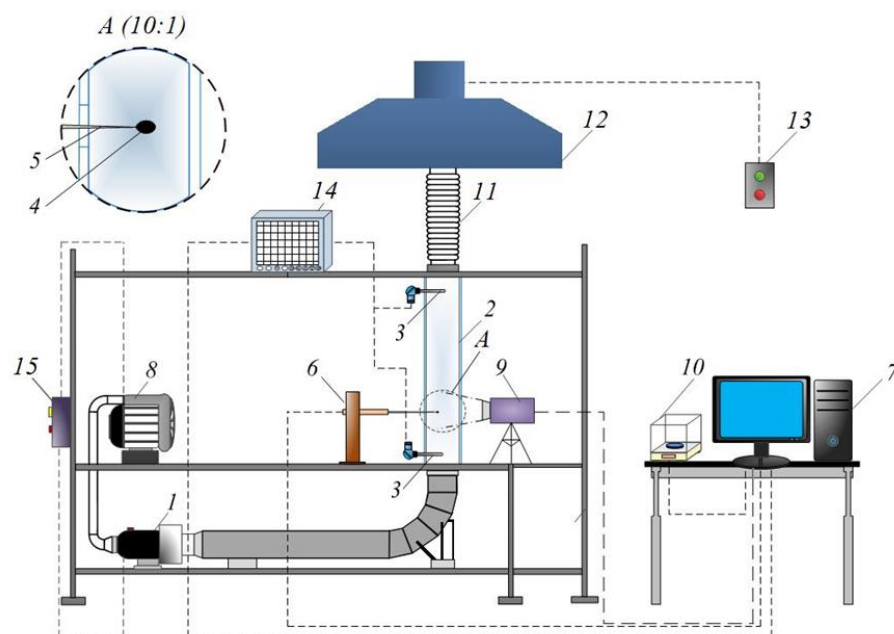


Fig. 1. scheme of experimental setup: 1 - heat generator; 2 - hollow transparent quartz cylinder; 3 - thermoelectric transducer; 4 - wood particle; 5 - needle thermocouple; 6 - coordinate device; 7 - personal computer; 8 - blower; 9 - high-speed video camera; 10 - analytical scales; 11 - flexible outlet gas pipe; 12 - exhaust venting box.

The second group of experiments was conducted on an experimental bench simulating the conditions of radiation-convective heating (Fig. 2). The simulator by its structure, the scheme of heating conditions formation, methods of registration and processing of the experimental results is similar to the simulator described in [1]. The setup was a vertically arranged hollow quartz cylinder. Oxidizer (air) by means of a vortex compressor was pumped into the heat generator, where it was heated to temperatures specified by the conditions of the experiment. After the heat generator, high-temperature air through a system of insulated pipelines was fed into a hollow quartz cylinder. Air flow temperature T_g (immediately before the fuel particle) was controlled by chromel-alumel thermocouples. The particle of wood biomass was fixed on a needle-holder and by means of a remote-controlled coordinate device (connected to a computer) was set on the symmetry axis of the

cylinder. The entire process of thermal preparation, ignition, and combustion of woody biomass particles was recorded by a high-speed video camera.

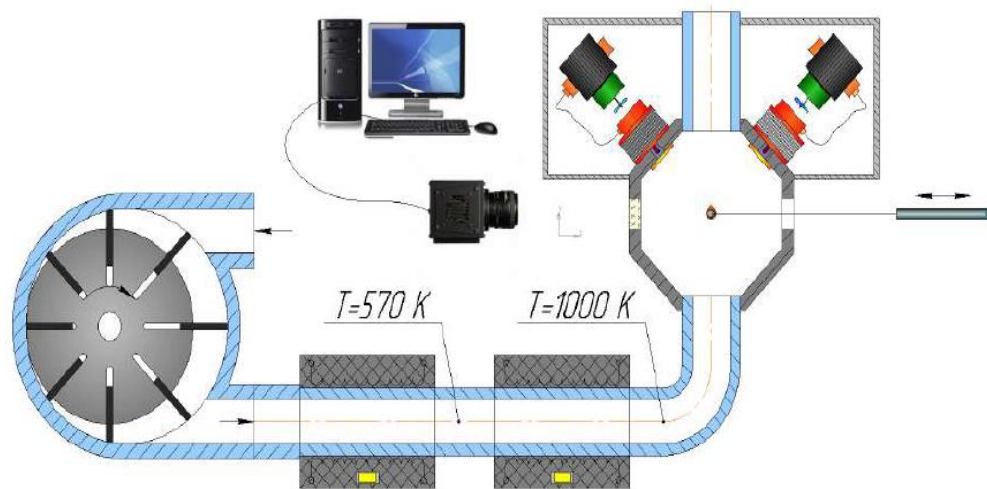


Figure 2. Schematic of the experimental bench to study the processes of ignition of particles of wood biomass in the conditions of RK-MV heating:

- 1 - heat generator; 2 - hollow transparent quartz cylinder;
- 3 - thermoelectric transducer; 4 - wood particle;
- 5 - needle thermocouple; 6 - coordinate device; 7 - personal computer; 8 - blower; 9 - high-speed video camera

The third experimental bench (Figure 2) is similar to the experimental bench shown in Figure 1 in its structural scheme and basic element base. The difference is that the hollow ceramic cylinder is replaced by a dodecahedron-shaped combustion chamber (Figure 2) located in a thermally insulated shell. High-temperature air was blown through this chamber. In the upper hemisphere of the combustion chamber, systems of four subsystems "magnetron-waveguide-antenna" were mounted so that the fuel particle placed on the symmetry line of the cylinder fell into the focus of radiation. All thermal preparation, ignition, and combustion processes were recorded with a high-speed video camera. The configuration of experimental benches allowed us to study the processes of ignition and combustion of wood biomass particles under significantly different heating conditions: radiation, radiation-convective, radiation-convective-microwave heating.

Methodology for planning and conducting experiments

To determine the time characteristics of the ignition process, a series of 15 experiments was performed for each value of T_g . The experimental results were processed using statistical methods. The number of experiments was varied (but not less than 15 at identical ambient temperatures) to minimize errors in determining t_{ign} .

It is also worth adding that, when studying the processes of ignition and combustion, the dependences of the ignition delay time, combustion time, and the intensity of formation of a particular reaction product on temperature usually have all the properties of exponential-type curves. Therefore, we can reasonably assume that, in accordance with the basic provisions of the theory of experimental planning [2], three points are sufficient to construct exponential dependences of the $t_{ign}(T_g)$ type.

Processing of the experimental results was carried out in accordance with the theories of statistical processing of experimental results and distribution of random variables in the approximation of the Gaussian distribution of ignition delay time values (for each individual value of T_g). The influence of one or another element of the factor space N (ambient temperature, wood moisture, etc.) was evaluated according to the Wilcoxon test (for dependent samples) and the Mann-Whitney test.

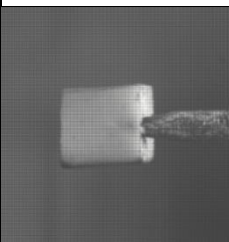
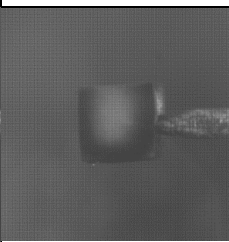

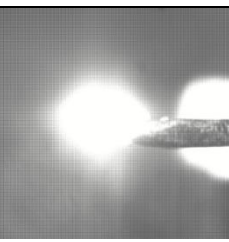
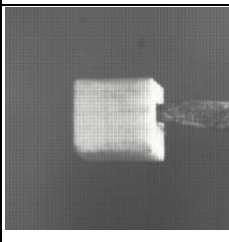
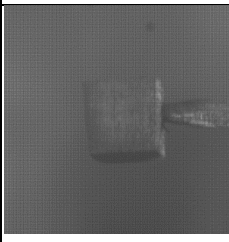
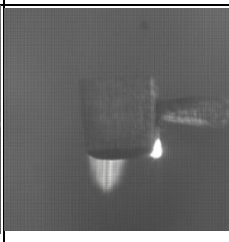
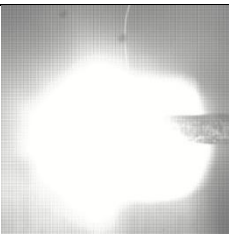
Results of an experimental. Delayed ignition times

Fig. 7, 8 show frames of a typical videogram, demonstrating the process of ignition of wood particles (not saturated with moisture - Fig. 7; with moisture content 47 % - Fig. 4) under microwave exposure under high-temperature radiation and convective heating. Analysis of frames shows that the process of thermal preparation can be conditionally divided into a number of consecutive interrelated stages. When entering a high-temperature environment and microwave field (standing wave), the fuel particle is heated due to convection and radiation, as well

as due to absorption of microwave radiation. This complex thermal effect initiates intense evaporation of intra-pore and adsorption-bound moisture. Further heating leads to thermal decomposition of the main components of the biomass. The latter is characterized by charring of particle surface (Fig. 7, 8 column II, characteristic darkening of biomass surface).

At the same time we can note that particle size slightly decreases (Fig. 9). Detailed (at high magnification) analysis of frames showed that particle size decreases by 13 % on average. Most likely, this is related to the thermal destruction of the main fuel layer, leading to the formation of a highly porous coal framework with a low impact toughness coefficient. As shown in [28], water vapor and gaseous products of thermal degradation of the main biomass components filter through the porous carbon framework and react chemically with carbon.

As a result, gaseous reaction products are formed inside the particle. The vapor-gas mixture formed in the intrapore structure leads to an increase in the internal pressure in the particle (as shown by the results of mathematical modeling [28]) and, accordingly, to the dispersion of the near-surface fuel layer, and to the entrainment of its part due to the aerodynamic effect of an external flow.

		I	II	III	IV
Кедр/Cedar	a				
		t=0 c.	t=13,7 c.	t _{ign} =27,37 c.	t=30,3 c.
	b				
		t=0 c.	t=11,6 c.	t _{ign} =23,28 c.	t=26,28 c.

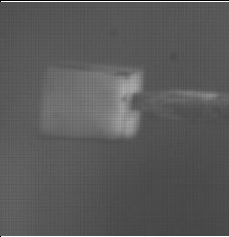
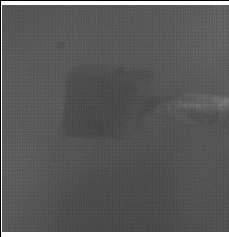
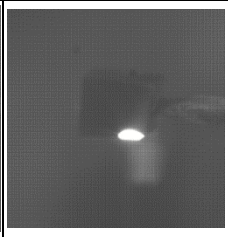

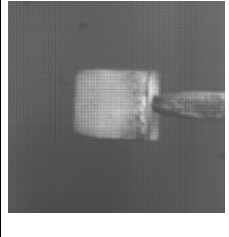

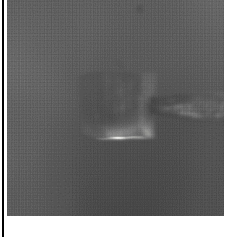
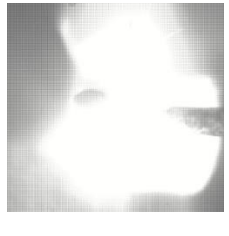
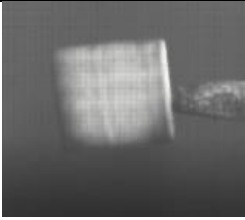
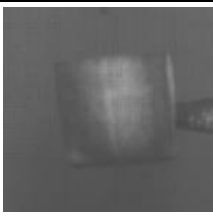


Сосна/Pine	a				
		t=0 c.	t=9 c.	t _{ign} =18 c.	t=21 c.
	b				
		t=0 c.	t=7,5 c.	t _{ign} =15 c.	t=18 c.

Fig. 7. Typical frames of the ignition process of dry wood biomass particles at ambient temperature $T_g=753$ K (a) under conditions of radiation-convective heating; b) under microwave exposure under high-temperature radiation-convective heating)

The volatile pyrolysis products together with water vapor are blown into the external environment, where they are mixed with the oxidizer and react thermochemically with air oxygen. The result is the ignition of the fuel particle (Fig. 3, 4, III). A flame sphere is formed, which, as a rule, exceeds the size of the particle (Fig. 3, 4, IV).

		I	II	III	IV
Кедр/Cedar	a				
		t=0 c.	t=11,4 c.	t _{ign} =22,8 c.	t=27,8 c.

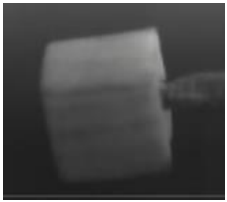
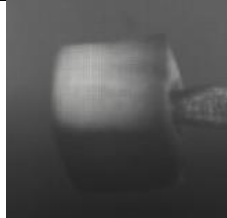
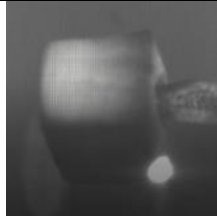
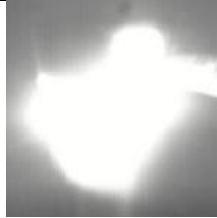
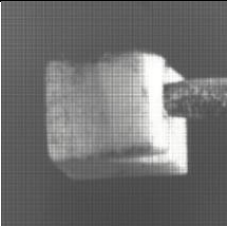
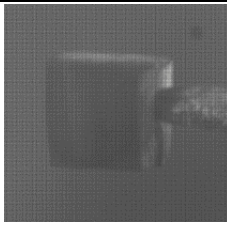
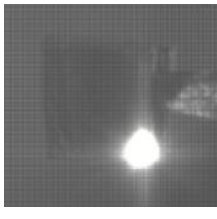
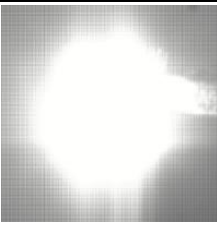
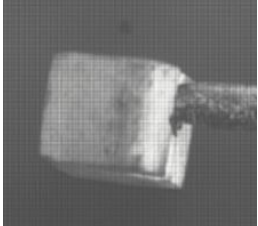
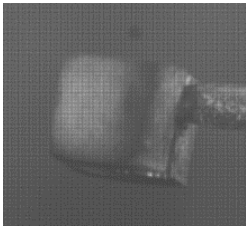
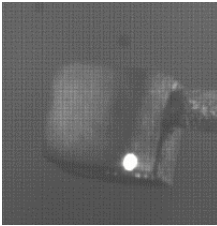
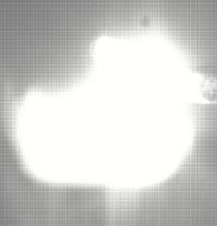
	b				
		t=0 c.	t=10,2 c.	t _{ign} =20,37 c.	t=25,37 c.
Cочна/Pine	a				
		t=0 c.	t=14,8 c.	t _{ign} =29,6 c.	t=34,6 c.
	b				
		t=0 c.	t=13,85 c.	t _{ign} =27,7 c.	t=32,7 c.

Fig. 8. Typical frames of the ignition process of moisture-saturated particles of wood biomass at ambient temperature $T_g=753$ K (a) under conditions of radiation-convective heating; b) under microwave exposure under high-temperature radiation-convective heating)

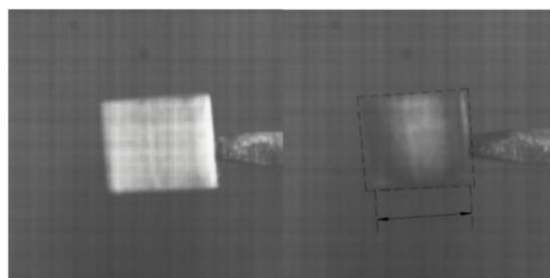


Fig. 9. Changes in fuel size during pyrolysis of a wood particle

One of the most important parameters that have a significant influence on the choice of design characteristics of furnace devices of boiler units is the ignition

delay time. This is primarily due to the fact that the t_{ign} values determine the size of the combustion chambers, the formation of the aerodynamic regime of the combustion chamber, and the temperatures of the combustion air. For example, an increase in the ignition delay time values will lead to an increase in the size of the combustion chamber. For this reason, determining the values of ignition delay times from the experimental results is an important step in building a general theory of ignition of solid fuels of different nature, on the basis of which the methodology for substantiating the choice of design characteristics of boiler units is already developed.

Based on the analysis of Fig. 6, we can conclude that microwave exposure leads to a fairly noticeable acceleration of the ignition of particles of wood biomass in the range of medium temperatures from 713 to 783 K. In the area of relatively low temperatures (from 713 to 753 K), exposure to microwave radiation leads to an increase in the ignition rate by an average of 12%.

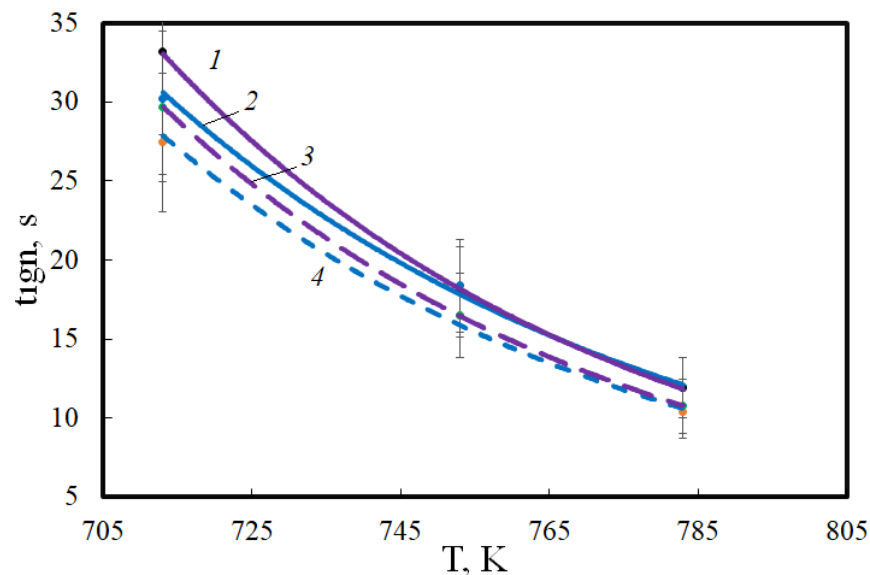


Fig. 6. Dependences of the ignition delay times of dry wood particles on the ambient temperature: 1, 3 - cedar particles; 2, 4 - pine particles; 1, 2 - radiation convection heating; 3, 4 - radiation convection-microwave heating

Fig. 10 shows the delay time dependences of ignition of dry particles of wood biomass (pine and cedar) in conditions of relatively low ambient temperatures under radiation-convective and radiation-convective-microwave heating.

Fig. Dependences of ignition delay times of moisture-saturated wood particles under conditions of radiation-convective and radiation-convective-microwave heating are shown in Fig. 7. Analysis of the results shown in Fig. 6, 7, showed that oxidizing medium temperatures have less influence on ignition delay times of moisture-saturated wood compared to dry wood. Thus, for dry wood particles, when T_g was increased from 713 to 785 K, the ignition delay times decreased practically 3 times. For wet particles in the same temperature range, the decrease was only 1.8 times. But at the same time, moist wood particles under the influence of microwave radiation ignited on average 18% faster compared with the conditions of exposure to radiation-convective heating. Comparative analysis of Fig. 6, 7 shows that the greatest effect of microwave exposure is achieved by ignition of moisture-saturated particles of wood biomass.

On the applicability of the results of experimental and theoretical studies in real practice

The results of experimental and theoretical studies give grounds to conclude that the technology of microwave impact on wood biomass particles during their ignition and combustion is highly promising. At the same time, according to the results of experiments, it was found that in this case there is an opportunity to burn wood in crushed form (in other words, with a characteristic particle size $d = 2-6$ mm).

Experimental results show that the use of additional microwave action to stabilize the ignition and combustion of wood particles is most acceptable when burning in a low-temperature regime (for example, in a low-temperature vortex by analogy with Shershnev furnaces or in a layer by analogy with). These are the so-called "low-temperature" furnaces. Under these conditions, the heat accumulated

(due to heat capacity) by the furnace space (combustion products, heat exchange surfaces, etc.) is insufficient for stable ignition of fuel particles. This "lack" of minimum (necessary for stable ignition) energy can be compensated by electromagnetic influence. In light of the fact that currently one of the most promising trends in boiler construction is the development of energy efficient low-temperature technology of fuel combustion with ultra-low NO_x and SO_x emission, the method of microwave heating of fuel can get a new impetus for development. Such technological solution allows directive lowering of the combustion temperature in the furnace space and, accordingly, minimizing (as far as possible) the formation of nitrogen oxides and sulfur in the fuel combustion products, while virtually not reducing the energy characteristics of the boiler unit (thermal efficiency, steam capacity, parameters of hot steam at the outlet of the boiler: pressure P, temperature T₀). In the future, using the technology of microwave heating of fuel particles in combination with the technology of co-combustion of wood biomass with coal (wood-coal mixtures) and ammonia at electron-beam impact it is possible to achieve complete sequestration of NO_x and SO_x.

According to the results of the experiments, it was found that the efficiency of microwave action increases with the ignition of moisture-saturated biomass. The latter creates prerequisites for the possibility of burning moist (without carrying out the procedure of preliminary thermal preparation - drying) woody biomass in furnaces. In this case, as established by the results of theoretical and experimental studies, combustion of moisture-saturated fuels leads to significant sequestration of sulfur and nitrogen oxides.

Conclusion

Experimental results show that the use of additional microwave action to stabilize the ignition and combustion of wood particles is most acceptable when burning in low-temperature mode (for example, in a low-temperature vortex by analogy with Shershnev furnaces or in a layer by analogy with). These are the so-

called "low-temperature" furnaces. Under these conditions, the heat accumulated (due to heat capacity) by the furnace space (combustion products, heat exchange surfaces, etc.) is insufficient for stable ignition of fuel particles. This "lack" of minimum (necessary for stable ignition) energy can be compensated by electromagnetic influence. In light of the fact that currently one of the most promising trends in boiler construction is the development of energy efficient low-temperature technology of fuel combustion with ultra-low NO_x and SO_x emission, the method of microwave heating of fuel can get a new impetus for development. Such technological solution allows directive lowering of the combustion temperature in the furnace space and, accordingly, minimizing (as far as possible) the formation of nitrogen oxides and sulfur in the fuel combustion products, while virtually not reducing the energy characteristics of the boiler unit (thermal efficiency, steam capacity, parameters of hot steam at the outlet of the boiler: pressure P, temperature T₀). In the future, using the technology of microwave heating of fuel particles in combination with the technology of co-combustion of wood biomass with coal (wood-coal mixtures) and ammonia at electron-beam impact it is possible to achieve complete sequestration of NO_x and SO_x.

According to the results of the experiments, it was found that the efficiency of microwave action increases with the ignition of moisture-saturated biomass. The latter creates prerequisites for the possibility of burning moist (without carrying out the procedure of preliminary thermal preparation - drying) woody biomass in furnaces. In this case, as established by the results of theoretical and experimental studies, combustion of moisture-saturated fuels leads to significant sequestration of sulfur and nitrogen oxides.

References

1. Seyhun N., Ramaswany H., Sumnu G., Ahmed J. Comparison and modeling of microwave tempering and infrared assisted microwave tempering of frozen potato puree.// *Journal of Food Engineering* 92. 2009. 339-344
2. Chemkhi S., Zagrouba F., Bellagi A. Modeling and simulation of drying phenomena with rheological behavior.// *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2005. V22. №2. pp. 153-163
3. Kolomeitsev V.A. Microwave systems with uniform volumetric heating / V.A. Kolomeitsev, V.V. Komarov.-Saratov: Publishing house of SSTU, 1998.-160p.

