



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 – 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

ООП – Экологически чистые технологии преобразования энергоносителей

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

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА**

Тема работы
Совместное сжигание углеродного остатка пиролиза отработанных шин с биомассой
УДК 662.61:[543.842+628.473.6]

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ11	Губин Артур Владимирович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент (НОЦ И.Н.Бутакова, ИШЭ)	Ларионов Кирилл Борисович	К.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	А.А.Сечин	к.т.н.		

Нормоконтроль (при наличии)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	М.А. Вагнер			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент (НОЦ И.Н.Бутакова, ИШЭ)	Губин Владимир Евгеньевич	К.т.н.		

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП**  
**Экологически чистые технологии преобразования энергоносителей**  
**по направлению 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника**

<b>Код компетенции</b>	<b>Наименование компетенции</b>
<b>Универсальные компетенции</b>	
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
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
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
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способен проектировать технологические системы и отдельные элементы систем преобразования энергоносителей
ПК(У)-2	Способен производить прогностическую оценку воздействия технологий энергетики на окружающую среду, применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности
ПК(У)-3	Способен проектировать и организовывать образовательный процесс с использованием современных технологий
ПК(У)-4	Способен применять современные методы и средства практической инженерной деятельности в сфере создания и эксплуатации современного оборудования и установок для экологически чистого преобразования энергоносителей
ПК(У)-5	Способен осуществлять управление технологическими процессами и энергетическими установками
ПК(У)-6	Способен определять потребности производства в ресурсах, обоснованию мероприятий по экономии энергоресурсов
ПК(У)-7	Способен производить сравнительный анализ технологий преобразования энергоносителей
ПК(У)-8	Способен формировать решения профессиональных задач путем интеграции фундаментальных разделов технических наук и прикладных знаний в сфере теплоэнергетики



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) 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

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

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

\_\_\_\_\_ В.Е. Губин

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Обучающийся:

Группа	ФИО
5БМ11	Губин Артур Владимирович

Тема работы:

<i>Совместное сжигание углеродного остатка пиролиза отработанных шин с биомассой</i>	
<i>Утверждена приказом директора (дата, номер)</i>	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	10 июня 2023 года
--	-------------------

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><b>Исходные данные к работе</b> <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<p>Целью обзора является сбор и обобщение информации об опыте применения, современном уровне развития и потенциале технологий совместного сжигания углеродного остатка отработанных шин с биомассой в мире и в России. Объектом исследования в работе является способ совместного сжигания топлива с биомассой в тепловых установках для нужд получения электрической и тепловой энергии с использованием парогазовых установок. Предметом исследования выступают факторы, определяющие возможность широкого применения технологий совместного сжигания топлива с биомассой в энергетике.</p>
--	---

<p><b>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке</b>  <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>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Методы утилизации отходов отработанных шин</li> <li>2. Анализ рынка утилизации отходов в России и мире</li> <li>3. Постановка проблемы утилизации отходов отработанных шин</li> <li>4. Определение технических характеристик топлива</li> <li>5. Экспериментальное исследование совместного сжигания углеродного остатка пиролиза отработанных шин совместно с биомассой</li> <li>6. Определить экономические затраты на выполнение выпускной работы.</li> <li>7. Проанализировать рабочие места на предмет выявления опасных и вредных факторов, оценить степень воздействия их на человека и природную среду.</li> <li>8. Заключение</li> </ol>
--	---

<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
--	--

<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>  <i>(с указанием разделов)</i></p>
---

Раздел	Консультант
<b>Финансовый менеджмент</b>	В.А.Маланина, к.э.н., доцент ОСГН
<b>Социальная ответственность</b>	А.А.Сечин, к.т.н., доцент ООД

<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</b></p>
<p>Результаты экспериментальных исследований совместного сжигания углеродного остатка с нефтяным коксом и биомассой</p>

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	10.12.22
--	----------

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	К.Б. Ларионов	к.т.н., доцент		10.12.22

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ11	Губин Артур Владимирович		10.12.22



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) 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Уровень образования Высшее магистр

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
5БМ11	Губин Артур Владимирович

Тема работы:

<i>Совместное сжигание углеродного остатка пиролиза отработанных шин с биомассой</i>
--

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	10 июня 2023 года
--	-------------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
26.01.2023	Сбор литературных данных и проведение анализа источников и нормативно-технической документации	15
02.03.2023	Разработка методики проведения экспериментов	20
04.04.2023	Проведение экспериментов и анализ полученных данных	20
12.05.2023	Разработка модуля «Финансовый менеджмент»	10
19.05.2023	Разработка модуля «Социальная ответственность»	10
26.05.2023	Выполнение раздела на иностранном языке	10
31.05.2023	Заключение	5
08.06.2023	Презентация	10
	Итого	100

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	К.Б. Ларионов	к.т.н., доцент		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	В.Е. Губин	к.т.н., доцент		

**Обучающийся**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ11	Губин Артур Владимирович		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 115 страниц, 21 рисунок, 22 таблицы, 96 источников.

Ключевые слова: пиролиз резины, сжигание, энергетическая утилизация резины, совместное сжигание, биомасса.

Объектом исследования являются отходы отработанных шин

Цель работы – исследование способа совместного сжигания углеродного остатка пиролиза отработанных шин и биомассы с целью уменьшения выбросов оксидов серы.

В результате выполнения работы было проведено исследование процесса совместного сжигания углеродного остатка изношенных шин с биомассой (древесные опилки и торф), определены технические характеристики образцов, проведены экспериментальные исследования, определение времени задержки зажигания, исследование выделяющихся в ходе процесса газофазных продуктов.

Экономическая значимость работы заключается утилизации отходов резинотехнических изделий с целью повышения экономичности работы электростанции за счет уменьшения расхода основного топлива

Область применения: утилизация РТИ в целях теплоэнергетики.

## Содержание

Введение.....	9
1 Современное состояние проблемы утилизации отработанных шин .....	10
1.1 Объемы формирования отходов шинной промышленности .....	10
1.2 Политика утилизации шин в Российской Федерации и мире....	13
1.3 Существующие подходы переработки шин .....	15
1.4 Пиролиз отработанных шин.....	20
1.5 Продукты пиролиза .....	21
1.6 Постановка проблемы использования углеродного остатка пиролиза шин в энергетике .....	32
2 Методическое обеспечение работы .....	35
2.1 Характеризация используемых образцов .....	35
2.2 Подготовка образцов.....	36
2.3 Исследование процесса окисления.....	37
2.4 Исследование процессов зажигания и горения .....	37
2.5 Исследование газовых продуктов.....	38
3 Результаты экспериментальных исследований совместного сжигания углеродного остатка с нефтяным коксом и биомассой.....	40
3.1 Термический анализ .....	40
3.2 Зажигание и горение .....	42
3.3 Анализ продуктов сгорания .....	47
4 Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность	51
4.1 Предпроектный анализ .....	51
4.2 Инициация проекта .....	55
4.3 Планирование управления научно-техническим проектом.....	57
4.3 Определение финансовой, социальной и сравнительной эффективности исследования.....	66
5 Социальная ответственность.....	74
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	74
5.2 Производственная безопасность.....	77
5.3 Анализ выявленных вредных факторов.....	78
5.4 Экологическая безопасность .....	85
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	86
Заключение .....	90
Список публикаций студента .....	94

Список использованных источников .....	95
Приложение А .....	104



## Введение

Развитие промышленности в настоящее время приводит к росту уровня жизни населения, увеличивает ассортимент и качество товаров, предоставляемых потребителю. За счет наращивания производственных мощностей промышленностью, происходит развитие рынка как в качественном, так и в количественном эквиваленте.

При этом, за счет роста производимой продукции, наблюдается и рост отходов как промышленности, так и вышедших из эксплуатации товаров. Вопрос утилизации отходов в Российской Федерации является особенно важным, ведь из-за обширной территории, самый используемый способ не переработка, а захоронение и складирование на свалках, что вредно сказывается на экологии и оказывает антропогенное воздействие на людей.

Одним из самых вредных для экологии отходы, загрязняющие окружающую среду – это резинотехнические изделия. Из резины производится огромное количество изделий: изоляционные покрытия, обувь, перчатки, уплотнения, шины и т.д. В настоящее время сложно представить комфортную жизнь человека без автотранспорта. Рост автомобильной промышленности растет и, следовательно, растет и спрос на шины.

Для решения проблемы утилизации изношенных шин по всему миру разработано множество технологий. К числу перспективных относятся газификация покрышек с получением синтез-газа (CO и H<sub>2</sub>), а также пиролиз с получением жидкого топлива газообразной фракции и твердой фракции – коксового остатка или промышленного углерода.

Объект исследования – изношенные шины, вышедшие из эксплуатации.

Предмет исследования – утилизация шин путем совместного сжигания с биомассой.

## **1 Современное состояние проблемы утилизации отработанных шин**

Загрязнение окружающей среды является актуальной проблемой в современном мире. Особенную угрозу создают трудно утилизируемые отходы промышленности. Развитие производства полимерных материалов и изделий приводит к увеличению количества отходов. Одним из таких видов полимерных отходов являются отработанные автомобильные шины.

Шины – один из самых важных продуктов в современном обществе, способствующих постоянному развитию глобальной транспортной отрасли и экономики. Каждый год в мире производятся миллиарды шин, что приводит к большому количеству изношенных и непригодных к использованию, следовательно, утилизация и переработка этих отходов является важной проблемой [1].

Как правило, шины изготавливаются с использованием нескольких слоев резины и многих других соединений, особенно сажи, которые помогают сформировать композитную структуру подходящей толщины. Качество шин зависит главным образом от соотношения различных соединений, используемых при их производстве и деталей процесса вулканизации, таких как: тип используемых материалов, время применяемого процесса и температура. Это улучшает предел прочности при растяжении, эластичность и другие качества резины [2].

### **1.1 Объемы формирования отходов шинной промышленности**

Производство шин – это одна из самых востребованных и развитых отраслей в настоящее время. Непрерывный рост спроса на автомобильные шины наблюдался в последние несколько лет до 2020 года [3,4]. Это связано с темпами производства автомобилей и развитием транспортной инфраструктуры.

Объем Российского рынка шин в 2014 году в натуральном выражении составил около 59 млн. шт. по оценке аналитического агентства «Текарт» [5].

Помимо этого, ежегодно, в России из эксплуатации выходит около 1 млн. тонн шин [6].

Данные маркетингового исследования [7] указывают на то, что по итогам 2015 года 80,8 % образованных отходов шин (в штучном эквиваленте) относятся к легковым автомобилям, 16,6 % – грузовые автомобили и 2,5 % – автобусы. При учете массы покрышек легкового, пассажирского и грузового автотранспорта, данная структура принимает вид (см. рис. 1).

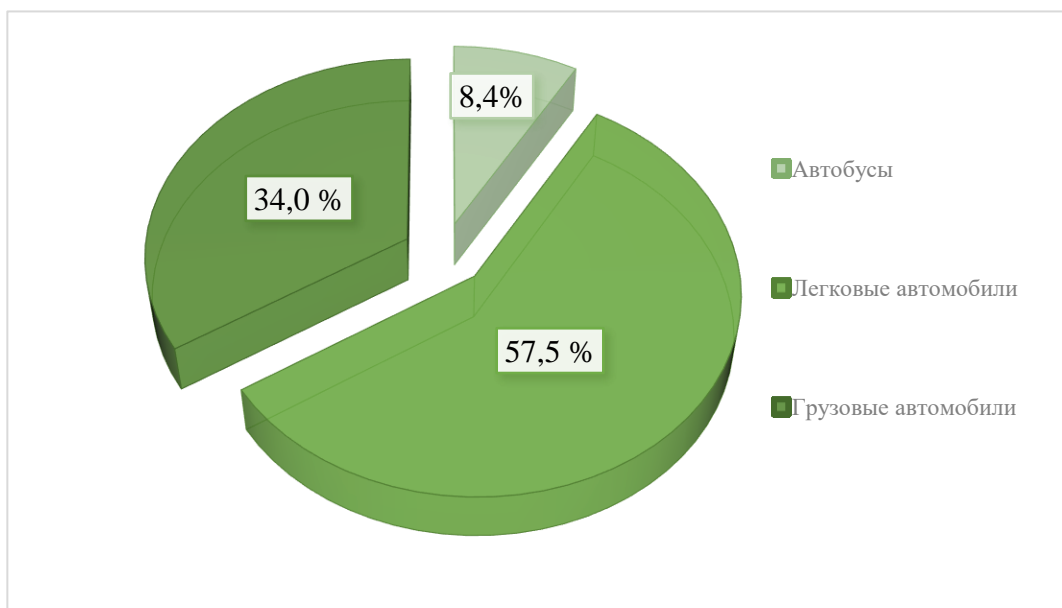


Рисунок 1 – Структура образования изношенных шин, % от общего массового объема (тыс. тонн) (по данным Федеральной службы государственной статистики РФ)

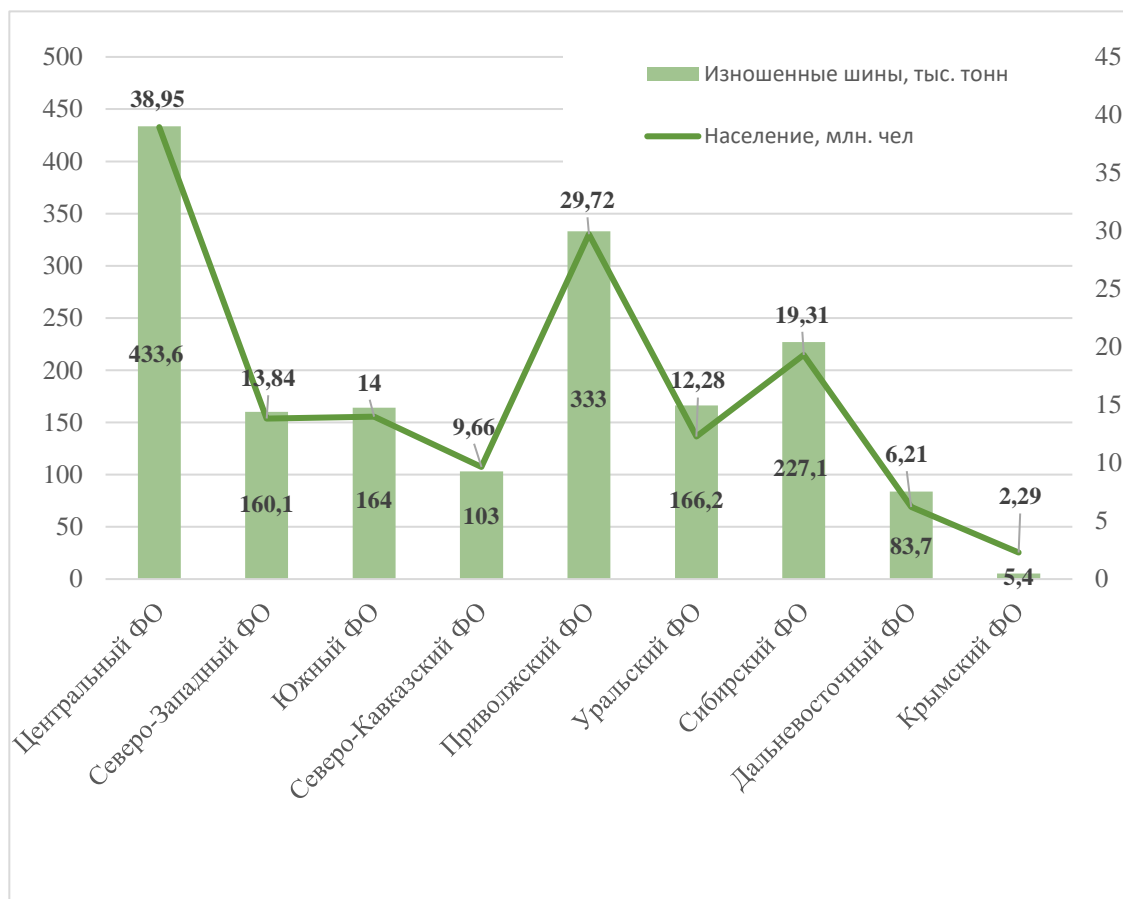
На рисунке 1 не представлены данные по шинам сельскохозяйственного сектора, так как отсутствуют достоверные данные по количеству сельскохозяйственной техники.

В России на одного человека приходится около 6,8 кг образующихся изношенных шин. В Японии этот показатель составляет около 6 кг на человека, по данным Европейской Ассоциации по вторичной переработке шин (ETRA) [8].

На рисунке 2 представлены данные о региональной структуре образования изношенных шин в России по итогам 2015 года. Таким образом, лидеры по объемам образования данного вида отхода – это Центральный (25,9 %) и Приволжский (19,9 %) федеральные округа. При проведении сопоставления данных по численности населения и объемов отходов изношенных шин,

наблюдается положительная закономерность, исключая Уральский федеральный округ, в котором сосредоточено большое количество предприятий тяжелой и средней промышленности.

Рисунок 2 – Региональная структура образования шинных отходов в России по



данным Федеральной службы государственной статистики РФ за 2015 г.

На рисунке 3 изображены данные по регионам с наибольшей производительностью отработанных шин в год.

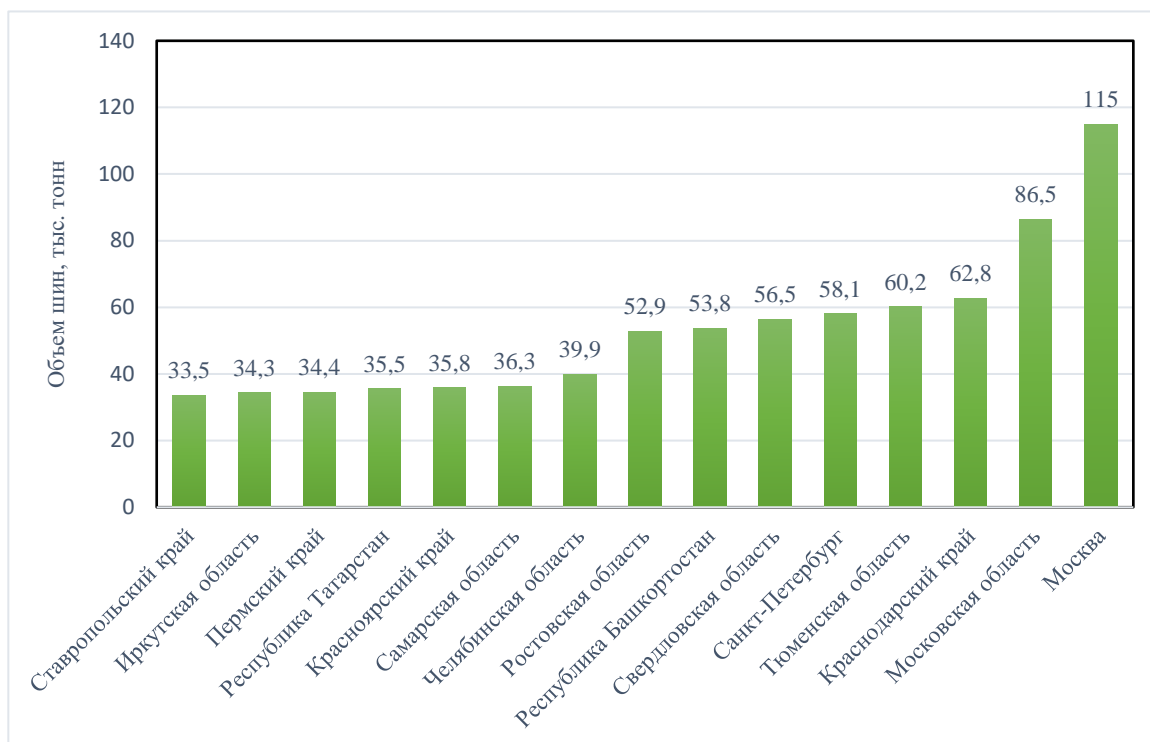


Рисунок 3 – Регионы по объемам образования изношенных шин

В 25 регионах России объем образования шинных отходов превышает 25 тыс. тонн. Лидеры по образованию шинных отходов – Москва (115 тыс. тонн), Московская область (86,5 тыс. тонн) и Краснодарский край (62,8 тыс. тонн).

## 1.2 Политика утилизации шин в Российской Федерации и мире

Из-за быстрого роста парка автомобилей на территории Российской Федерации, обострилась проблема по утилизации отработанных шин. Большое число развитых стран мира перерабатывают автомобильные шины, так как они являются источником ценного сырья.

В наше время огромное внимание уделяется процессам переработки резинотехнических отходов, в том числе изношенных шин транспортных средств. Европейский союз был вынужден принять специальную директиву в 2003 году, которая запрещает сжигание такого рода отходов, что было связано с экологической опасностью данного процесса. Помимо этого, Европейский союз в 2006 году принял решение о запрете захоронения как целых, так и разрезанных шин [9]. Существует несколько подходов к переработке отработанных покрышек,

в частности, сжигание покрышек с получением тепловой энергии, измельчение покрышек с получением резиновой крошки, которая используется в качестве добавок в строительстве и для улучшения свойств нефтяных битумов [10].

Количество вывозимых на полигоны шин в Европе и США очень мала, что связано с их восстановлением и переработкой с получением полезных продуктов для энергетики и других отраслей промышленности. По данным Европейской Ассоциации по вторичной переработке шин (ETRA) [8], переработка более 80 % отработанных шин происходит термическим или механическим способами. В этих странах существует законодательный запрет на утилизацию цельнолитых и шлифованных покрышек со штрафными обременениями для предприятий и населения. Помимо данных мер, введены системы бюджетного стимулирования мусороперерабатывающих предприятий.

В Российской Федерации на данный момент также имеется ряд законодательных запретов, но, несмотря на них, значительная часть отработанных шин хранится на полигонах и свалках (около 63%). Это связано с отсутствием развитой системы логистики, организованной системы сбора и сортировки мусора и комплексной правовой системы. Главная сложность развития отрасли по переработке шин заключается в том, что большинство изношенных покрышек образуется в частном секторе. Из этого следует, что обычный автолюбитель не заинтересован затрачивать собственные средства на доставку шин до пункта приема для дальнейшей утилизации [11]. Существующие в данный момент предприятия, занимающиеся утилизацией изношенных шин, работают, в основном, с сырьем, поступающим от юридических лиц, таких как: шинные заводы, автохозяйства, шиномонтажные компании, автосервисы и т.д.). В 2019 году захоронение отработанных шин на специализированных полигонах было запрещено, но, несмотря на это, количество несанкционированных свалок и скоплений на общественных свалках отходов остается на высоком уровне.

Класс опасности данного вида отходов – IV, что затрудняет его захоронение. Данный вид отходов обладают высокой пожароопасностью [12], при горении образуются токсичные газы, загрязняющие атмосферу, почву и воду [13].

### 1.3 Существующие подходы переработки шин

На рисунке 4 представлена структурная схема наиболее распространенных технологических направлений утилизации (переработки) изношенных шин.



Рисунок 4 – Структурная схема технологических направлений переработки и/или утилизации отработанных шин

В настоящее время самые распространенные способы переработки шин – это измельчение и термическая конверсия с получением вариативных видов источников энергии или иных полезных продуктов. Дополнительной сложностью, из-за которой захоронение является более выгодным способом утилизации, является сложность самой переработки отработанных шин, так как данный процесс достаточно энергоемкий, технологичный, требующий серьезных капиталовложений и участия в самом процессе высококвалифицированных кадров.

Одним из решений по снижению углеродного следа от шинной промышленности является их восстановление и дополнительное продления жизненного цикла. Процесс восстановления заключается в обновлении либо протектора шины, либо протектора и боковины, с целью продления срока эксплуатации. При этом, такое решение является экологичным способом. Это приводит к уменьшению количества отходов, а также экономии ресурсов, ведь для

восстановления шины необходимо в среднем энергии, содержащейся в 5 л сырой нефти, а для производства автопокрышки – в 35 л.

В настоящее время наиболее популярны две технологии восстановления изношенных шин:

- 1) Наложение нового протектора «горячим» методом;
- 2) Наложение нового протектора «холодным» методом.

На территории Российской Федерации существует несколько производств по восстановлению покрышек «холодным» методом. В основном данный метод используется для восстановления шин авиационного транспорта и легковых автомобилей. Авиационные шины требуют большого внимания из-за сложных условий при полете, следовательно они имеют прочный многослойный каркас [14], при нормальных условиях эксплуатации которых могут восстанавливаться до 5-6 раз.

В то же время следует учитывать, что стоимость восстановления шин легковых автомобилей в расчете на километр пробега сопоставима с затратами на производство новых шин, что делает их восстановление экономически нецелесообразным. Также следует учитывать, что потребители воспринимают данный вид продукта как товар второго сорта, что значительно снижает его конкурентоспособность на рынке.

В рамках данной работы особое внимание следует уделить двум направлениям: измельчение и термическая конверсия.

### 1.3.1 Измельчение

Область применения резинового гранулята и крошки достаточно разнообразны и зависят, главным образом, от фракции и качества крошки [15]. Важно отметить, что современные линии переработки шин могут производить различные фракции крошки без каких-либо изменений в оборудовании или процессе переработки.

При этом фракционный состав определяет тип изготавливаемой продукции и область ее применения.



1) Фракция менее 0,1 мм – Тиоколовая (полисульфидные) системы в качестве основы и связующего, вместе с мелкими заполнителями, образуют прочное покрытие, которое можно использовать как в качестве отделочного, так и декоративного настенного покрытия;

2) Фракция 0,2 – 0,45 мм – Используется в качестве добавки (5-20%) в резиновые смеси для производства новых автомобильных шин, массивных шин и других резинотехнических изделий. Порошки от 0,2 до 0,45 мм могут быть использованы для производства регенерата. Они изготавливаются путем измельчения специально обработанную крошку и введения добавок для улучшения ее свойств;

3) Фракция 0,6 мм – Используется в качестве добавки (до 50-70%) при производстве резиновой обуви и других резинотехнических изделий. Свойства такой резины (прочность, деформируемость) практически идентичны свойствам обычной резины, изготовленной из сырого каучука;

4) Фракция до 1 мм – Используется в производстве композитной кровли (рулонной кровли, резинового шифера), рельсовых подкладок, резинобитумных мастик, вулканизированных и невулканизированных рулонных гидроизоляционных материалов. Популярностью пользуются наполные материалы из крошки размером 0,6-1,2 мм. Перспективной областью применения порошкообразной резины является использование в качестве наполнителя в различных синтетических термопластах. Порошкообразная резина 0,5-1,0 мм также используется в качестве добавки для модификации нефтяного битума в асфальтобетонных смесях, применяемых в дорожном строительстве, улучшая их деформационные и фрикционные свойства.

5) Фракция до 2 мм – Резиновая крошка с размером частиц 2 мм в смеси с текстилем используется для изготовления сорбентов для извлечения нефти и нефтесодержащих продуктов с поверхности воды и почвы. Основным его преимуществом является высокая сорбционная способность по отношению к сырой нефти и жидким нефтепродуктам по сравнению со всеми другими известными сорбентами на основе резинового порошка.

Порошки этой фракции также используются для тампонирования нефтяных скважин, гидроизоляции и т.д. данный сорбент рекомендован НИИ коммунального водоснабжения и очистки воды для очистки воды от нефтепродуктов на автомойках.

6) Фракция 2-10 мм – Используется для производства массивных резиновых плит для комплектования железнодорожных переездов, отличающихся длительностью эксплуатации, хорошей атмосферостойкостью, пониженным уровнем шума и современным дизайном.

7) Фракция 20-50 мм – Чипсы с металлокордом используются как добавка к коксу при плавке металла в домне или в качестве сырья для термической конверсии (пиролиз, газификация, сжигание).

В настоящее время в мире существует значительное количество предприятий по производству резиновой крошки из изношенных шин и других резинотехнических отходов. Однако, общее количество отходов, перерабатываемых в крошку во всем мире, никогда не превышает 20% от их годового накопления. Это связано с узким и насыщенным рыночным спросом на резиновую крошку (по сравнению с производством шин и резинотехнических изделий). Технологический процесс получения крошки из резинотехнических отходов обычно включает в себя разрезание шины на фрагменты с помощью специализированного оборудования, отделение металлокорда от резины с помощью валковых или молотковых дробилок, сепарацию корда и последующее мелкое дробление резины. Для тонкого измельчения полученных фрагментов используются шредеры, ножевые дробилки, фрезерные дробилки и мельницы для тонкого помола.

Одним из недостатков технологии получения резиновой крошки при температуре окружающей среды является неоднородность поверхности получаемых частиц крошки, что приводит к увеличению удельной поверхности и может интенсифицировать процесс окисления. Еще одним существенным недостатком является образование пыли в процессе измельчения, что требует

использования ряда оборудования, включая: циклоны, фильтры, рукава, дымососы и т. д.

Существуют также термические методы измельчения. Криогенное измельчение с использованием жидкого азота замораживает шины до тех пор, пока они не станут хрупкими, после чего они измельчаются для отделения металлокорда от волокон. Затем измельченная резина отправляется на специальную валковую мельницу для нарезки, где она измельчается до точно контролируемого размера частиц.

Таким образом, преимуществом данной технологии является производство высококачественного, тонко измельченного резинового порошка, который имеет более широкий спектр применения по сравнению с обычной крошкой и чипсами.

Однако, из-за высоких энергетических затрат на его производство данная технология может применяться только на предприятиях с большими производственными мощностями жидкого азота, так как на 1 кг резинотехнических изделий требуется 3 кг жидкого азота.

Основными недостатками данного метода являются высокие энергозатраты, высокая стоимость доставки жидкого азота, а также потери при выгрузке и хранении (до 30%).

### 1.3.2 Термическая конверсия резинотехнических отходов

Методы термического преобразования в настоящее время являются одними из наиболее эффективных и масштабных направлений переработки отработанных шин. Среди прочего, это связано с возможностью организации многотоннажных процессов переработки с возможностью вторичного использования до 90% [16].

К таким методам относятся: сжигание, газификация и пиролиз.

#### 1.3.2.1 Сжигание

Сжигание изношенных шин направлено на преобразование горючих отходов в инертные остатки путем контролируемого высокотемпературного сжигания. Процесс горения происходит самопроизвольно при температуре выше 400 °С и становится самоподдерживающимся после начала реакции. С экологической точки зрения использование изношенных шин для производства

энергии оценивается неоднозначно. В основном это связано с выбросом в атмосферу соединений цинка и оксидов серы.

#### 1.3.2.2 Газификация

Термохимический процесс, при котором органические вещества превращаются в газовую смесь (синтез-газ) при высоких температурах (800–1000 °С) и высоком давлении с получением вторичных продуктов, таких как вода или уголь. Газификация при высоких температурах и в контролируемых условиях превращает большую часть биомассы в газообразные продукты.

#### 1.3.2.3 Пиролиз

Эндотермический процесс, направленный на термическое разложение материалов, вызванное нагреванием в бескислородной или обедненной кислородом атмосфере. Пиролиз отработанных шин до настоящего времени был ограничен во всем мире, но пилотные и полномасштабные установки достигли значительных успехов. Продукты пиролиза составляют около 50% от первоначального объема органического вещества и должны быть далее преобразованы в энергетически ценное сырье. Процесс обычно начинается с предварительного нагрева измельченного материала, который подается в реторту при температуре 400-600°С. Пиролиз также позволяет извлекать ценные вещества в жидких углеводородах, углеродистых материалах и газофазных соединениях путем обработки, а не сжигания.

### **1.4 Пиролиз отработанных шин**

Существует множество критериев для классификации пиролизных установок. Она основана на способе подачи теплоносителя (греющей среды), где источником этой энергии является:

- 1 Теплота сгорания сырья или продуктов пиролиза внутри реактора;
- 2 Тепло, подводимое внутрь инертным газом или материалом (песок);
- 3 Тепло, подводимое дымовыми газами или электричеством через наружные стенки или от внутренних радиаторов (косвенный нагрев);

4 При атмосферном давлении, вакууме [17–20] или избыточном давлении инертного газа, в отсутствие или в присутствии катализатора [21–24].

Типы пиролизных установок, представленные схематически на рисунке 5, оказывают ключевое влияние на выход нефти и газа, а также на состав и качество третьего основного продукта пиролиза – углерода или активированного угля.



Рисунок 5 – Типы пиролизных установок для переработки отработанных шин [25–27]

### 1.5 Продукты пиролиза

Основные продукты пиролиза отработанных шин традиционно делятся на три группы: жидкие, газообразные и твердые [28]. Независимо от технологических параметров и способа проведения процесса пиролиза, выход каждого из вышеперечисленных продуктов может варьироваться в довольно узком диапазоне (рис. 6). Кроме того, вне зависимости от типа реактора, массовые соотношения получаемых продуктов варьируются в следующих диапазонах – до 20 % масс. % газа, 30-50 масс.% твердых и 40-65 масс.% жидких продуктов.

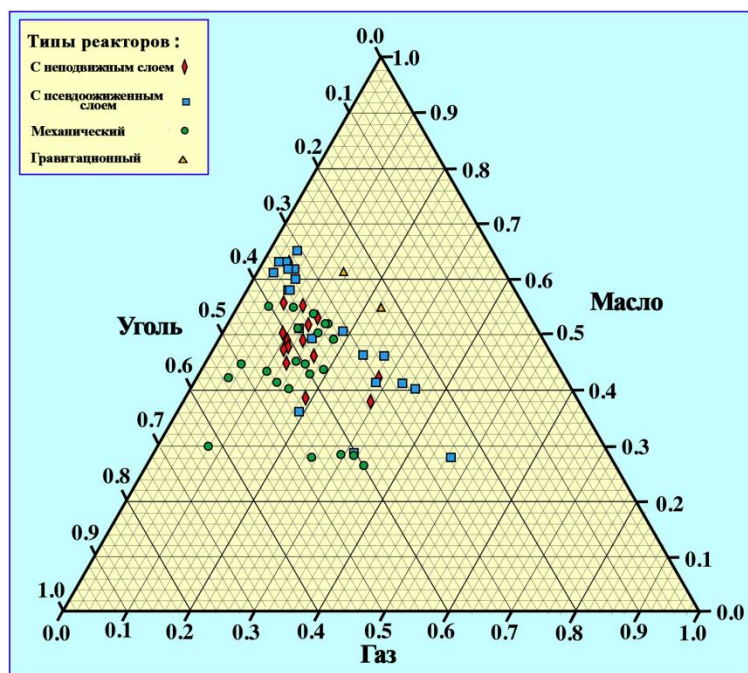


Рисунок 6 – Тернарная диаграмма состава продуктов пиролиза в зависимости от способа реализации процесса пиролиза

Химический состав и характеристики получаемых продуктов меняются в широком диапазоне, что позволяет использовать их во многих сферах деятельности.

Полученный твердый продукт представляет собой углеродный материал сложной морфологии и свойств. Если добавить к асфальту [28] фильтрующий материал, то можете использовать его в качестве добавки к асфальту [29].

Жидкие продукты пиролиза – это смесь углеводородов широкого спектра. Их можно использовать для топлива для энергетического оборудования [30] и сырья для химической промышленности [31].

### 1.5.1 Влияние температуры пиролиза на качество получаемых продуктов

График, который иллюстрирует массовый выход твердой фракции при пиролизе покрышек при разных температурах, приведен на рис. 7. В общем случае увеличение температуры содействует уменьшению выхода твердой фракции при повышении температуры до 400 °С, а дальнейший подъем температуры содействует стабилизации этой величины на уровне 35-45 масс.%. При других равных, установки конического и привычного кипящего слоя обеспечивают меньшие значения выхода твердой фракции, а установки с механическим нагревом через стенку (трубчатая, шнековая и автоклавная установки) – большие.

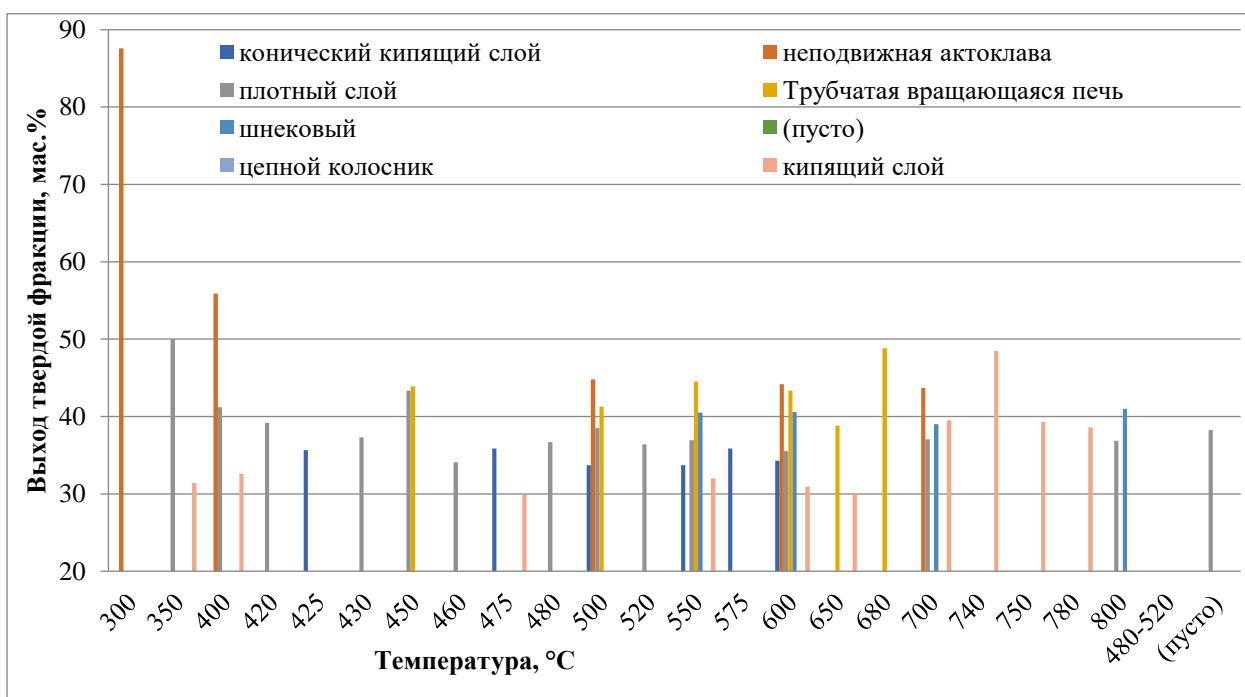


Рисунок 7 – Зависимость выхода твердой фракции от температуры процесса пиролиза

Тернарные диаграммы соотношения фракций при различных температурах процесса приведены на рис. 8.

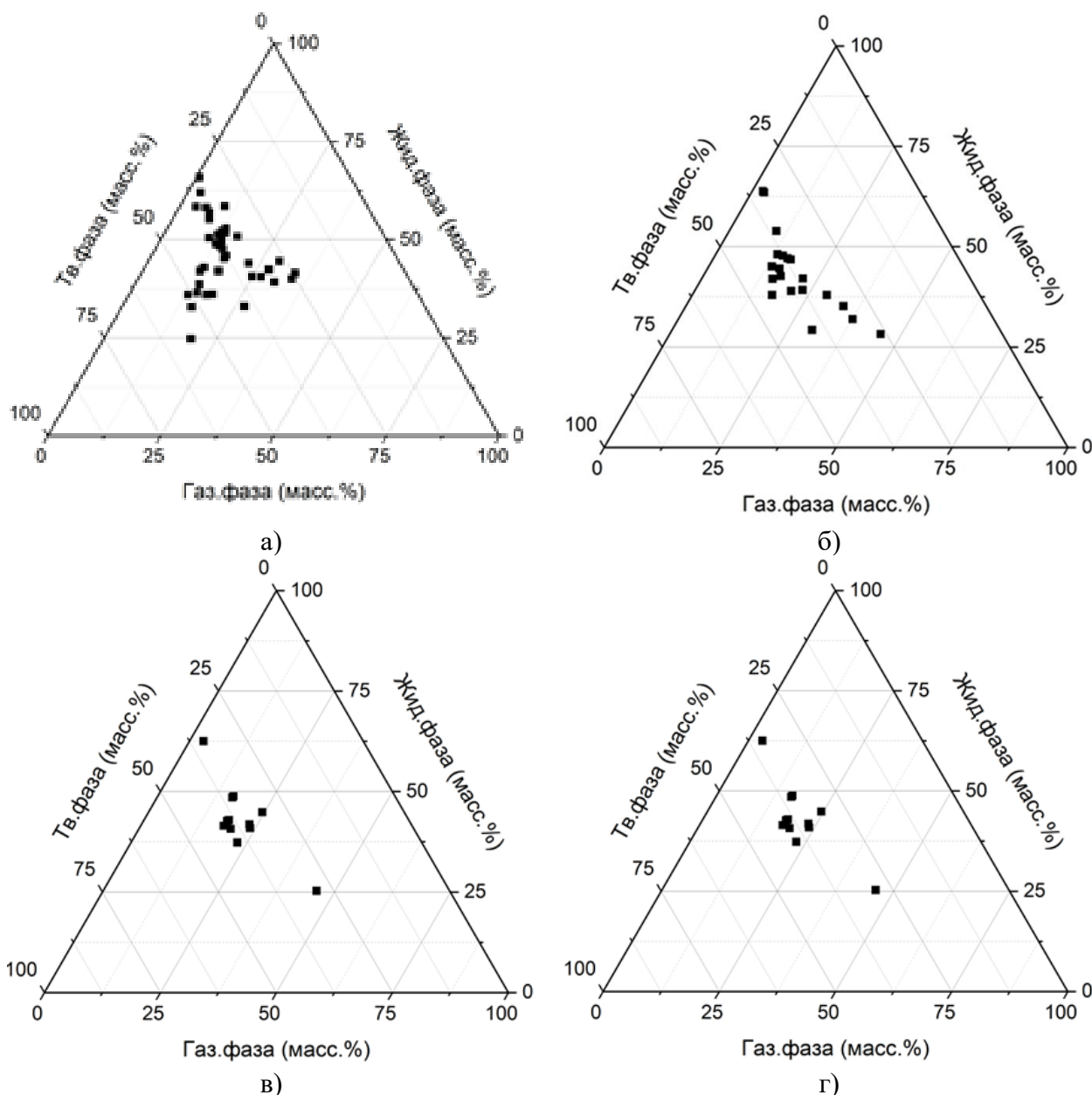


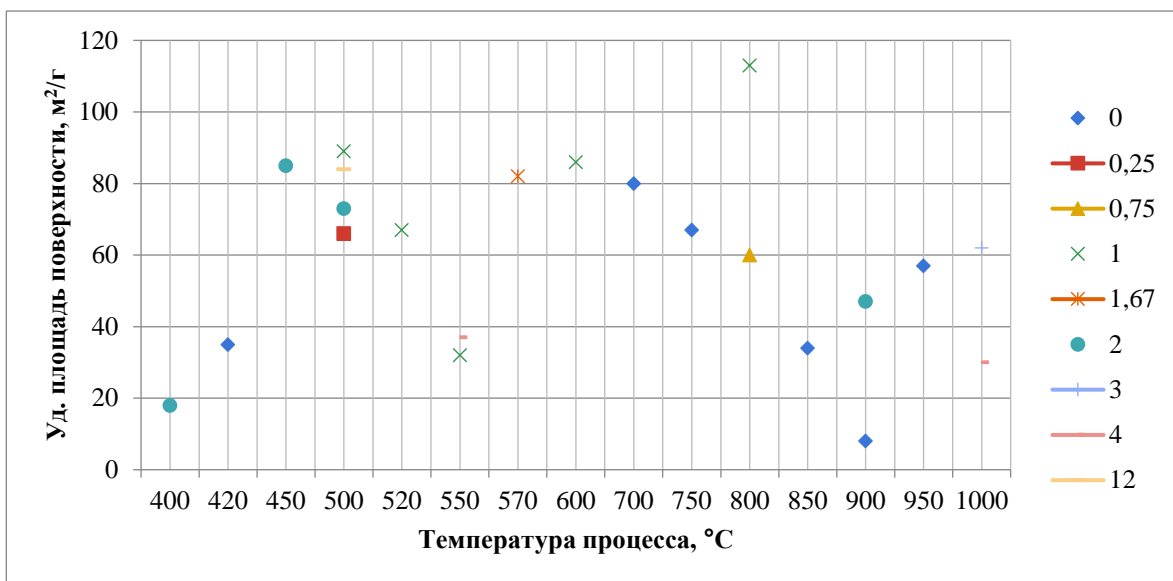
Рисунок 8 – Тернарные графики выхода продуктов в зависимости от температуры процесса пиролиза: а – 400-499 °С; б – 500-599 °С;

в – 600-699 °С; г – 700-799 °С

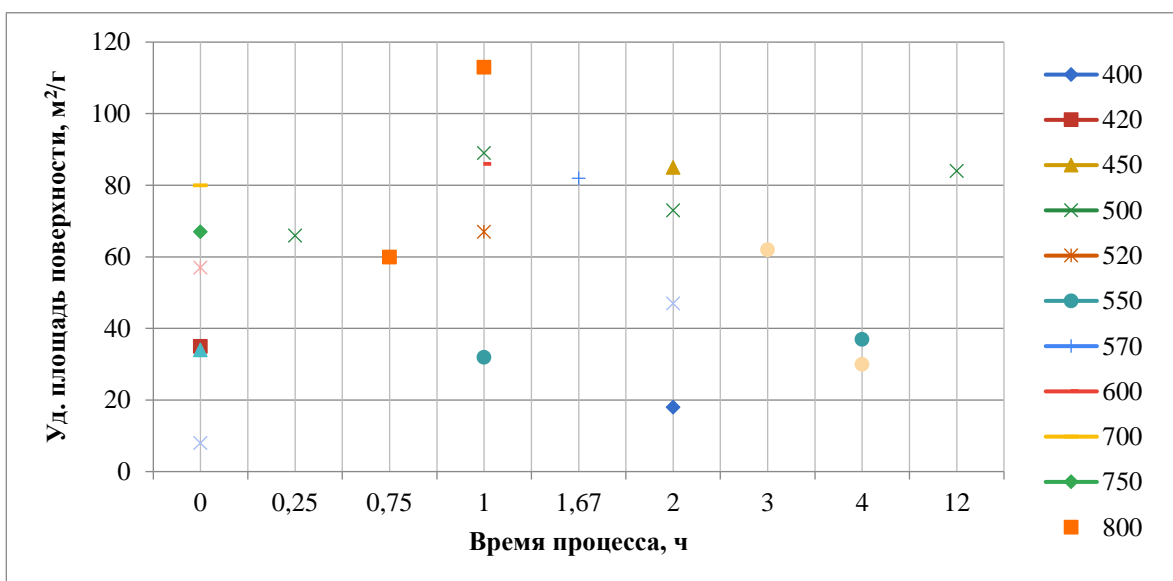
Установлено, что в условиях инертной среды при температурах, которые характерны для процесса пиролиза (400-600 °С) воздействие температуры на распределение продуктов несущественно: выход твердой фазы отвечает 30-40 масс.%, газовой фазы – 10-25 масс.%, жидкой фазы – 40-60 масс.%. С дальнейшим повышением температуры наблюдался подъём доли газофазных продуктов за счет продуктов твердой и, в первую очередь, жидкой фаз. При данном в ряде работ отмечается [32], что имеет место оптимальная температура, при которой выход



жидкого изделия максимален: в [32] указано, что она составила 650 °С при пиролизе покрышек мотоциклов и 750 °С для покрышек легковых и грузовых автомобилей, в – 550 °С [33].



а)



б)

Рисунок 9 – Зависимость удельной поверхности образцов твердофазного продукта пиролиза покрышек [34]: а – зависимость от температуры при различном времени выдержки, б – зависимость от времени выдержки при различной температуре

Состав жидких продуктов пиролиза при повышении температурного режима пиролиза менялся в зависимости от температуры. с её увеличением

наблюдался рост содержания ароматических веществ и снижение содержания альфатических веществ [35,36]. При этом достаточно подробные исследования в области получения дилимонена позволили идентифицировать, что [37] с повышением температуры его содержание сначала увеличивается по мере увеличения полноты конверсии топлива, а после начинает снижаться в связи с разложением сформированного дилимонена. Аналогичные закономерности могут быть использованы и для прочих органических компонент жидких продуктов пиролиза. При более высоких температурах при пиролизе в реакционной среде ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) указывается, что с повышением температуры (а также с расходом среды и времени пребывания [38]) наблюдается процесс взаимодействия жидких и твердых продуктов с продувочным газом, что приводит к активации продукта и увеличению площади его удельной поверхности [38,39]. При этом процесс активации должен реализовываться при более высоких температурах, порядка 800-900 °С [40]. Менее существенная убыль массы (порядка 2-7 масс.%) наблюдалась и при активации твердофазного продукта в инертной среде [41], однако максимальная достигаемая величина площади удельной поверхности оставалась на уровне 80-85 м<sup>2</sup>/г. Указанный результат является достаточно характерным для различных технологических решений.

Наработаны данные по совмещению процессов пиролиза и активации твердофазного продукта за счет предварительного внесения добавок: КОН,  $\text{ZnCl}_2$  и  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . Установлено, что существует оптимальная температура процесса, соответствующая 700 °С (для КОН) и 500 °С (для  $\text{ZnCl}_2$  и  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), при которой площадь удельной поверхности полученных образцов была максимальной [42]. При этом, наблюдается значительное снижение выхода твердофазного продукта – до 16 масс.% в точке оптимума – что в 2-2,5 раза меньше средних значений для данного параметра.

Высокая зольность твердого продукта также является существенной проблемой его внедрения, при этом зависимость зольности твердофазного продукта от температуры в реакторе является крайне слабой – см. рис. 10.

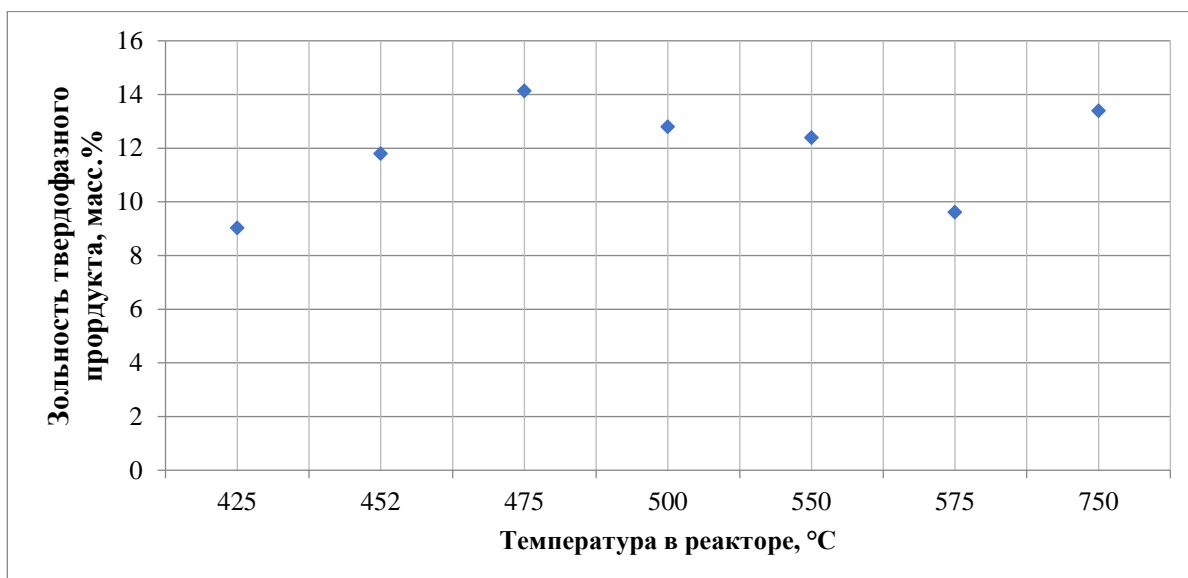


Рисунок 10 – Зависимость зольности твердофазного продукта от температуры в реакторе

### 1.5.2 Влияние давления на качество получаемых продуктов

Данные по процессу пиролиза покрышек в условиях избыточного давления крайне ограничены.

Работы [43,44] указывают, что повышение давления процесса пиролиза приводит к снижению выхода газообразных продуктов с 5 до 2 масс.% с увеличением давления с 0,1 до 2 МПа и к снижению выхода жидких продуктов с 45 до 32 масс.% с увеличением давления с 0,1 до 1,5 МПа. При этом увеличение давления приводит к снижению содержания  $H_2$  и  $CO_2$  в газообразных продуктах пиролиза, в то время как содержание метана и углеводородов увеличивается [45]. При этом данные по характеристикам процесса пиролиза в области высоких давлений достаточно ограничены. Так, в исследованиях Жэнга Ю. [46] в условиях высоких давлений пара (до 28 МПа) было обнаружено, что с ростом давления выход жидких продуктов снижался до 15-20 масс.%, в то время как выход твердофазных продуктов увеличивался (вероятнее всего, из-за неполноты конверсии исходной резины). При этом термин «пиролиз» в отношении таких технологий часто заменяется термином «гидротермическая обработка», т. к. помимо процессов десорбции продуктов и химического реагирования большую роль начинают играть процессы растворения компонент в данной среде. Схожие

результаты наблюдались в отношении реализации пиролиза в условиях вакууметрического давления – рис. 11. При этом следует отметить, что полученные данные не позволяют выявить однозначную закономерность выхода продуктов от давления и температуры, свидетельству о более сложном характере данной зависимости.

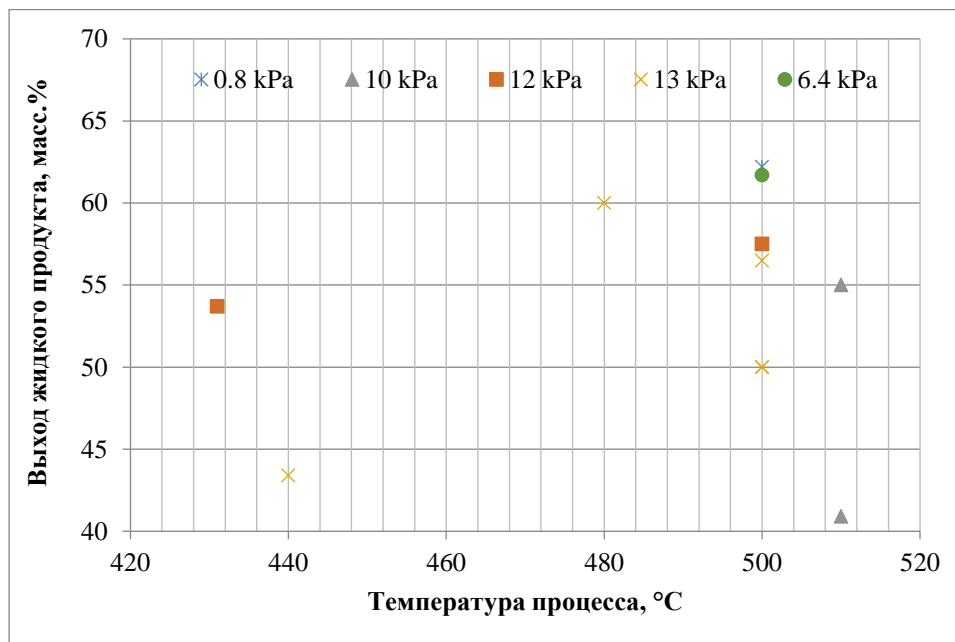


Рисунок 11 – Зависимость выхода жидкого продукта в ходе пиролиза покрышек в условиях вакууметрического давления

Увеличение давления привело к значительному росту содержания одноциклических углеводородов в жидких продуктах за счет снижения содержания циклоалкенов, альфатических кислот и алкенов, т. е. имеет влияние аналогичное повышению температуры. В [45] указано, что увеличение давления от 0,1 до 1 МПа (совместно с увеличением времени пиролиза), приводит к увеличению содержания олефинов (наиболее значительный рост наблюдался в отношении D-лимонена), в то время как содержание всех моноциклических ароматических углеводородов значительно снижалось.

### 1.5.3 Влияние времени пребывания пиролиза на качество получаемых продуктов

Время пребывания исходного материала в реакторе оказывает наиболее значительное влияние [45] на содержание газовой фазы – по мере его увеличения содержание продуктов в газовой фазе возрастает, в то время как содержание продуктов в жидкой и твердой фазах снижается, при этом, большая часть снижения реализуется за счет жидкофазных продуктов. Сложные углеводороды жидкой и газовой фазы также распадаются при увеличении времени пребывания в реакторе, что приводит к снижению их содержания. При этом в работе [33] отмечается, что со временем содержание жидкой фазы в продуктах растет. При этом ожидается, что со временем данная величина достигнет своего максимального значения. В большинстве работ указывается, что оптимальное время пребывания покрышки в реакторе варьируется в диапазоне 30-60 минут [47–49] (в случае использования частиц покрышки с минимальным/характерным размером 1-2 см в условиях плотного слоя). С увеличением времени пребывания образца в реакторе, снижается содержание водорода и летучих веществ в твердом продукте, при этом зольность продукта растет [50]. Для реакторов быстрого пиролиза соответствующие времена гораздо меньше – порядка 0,1-1 секунд – однако для них это время является производным от максимальной температуры в реакторе и скорости нагрева [51].

Формально, поскольку время пребывания покрышки в реакторе является одной из важнейших переменных в уравнении скорости реакции, косвенно время пребывания может определяться с использованием кинетических параметров соответствующего процесса – энергии активации предэкспонента. Характерные диапазоны величин энергии активации приведены на рис 12 [52–59]. Видно, что значения энергии активации существенно варьируются от работы к работе. Также приведенные в литературе кинетические данные, в большинстве, основаны на результатах термогравиметрического анализа, которые значительно отличаются от условий реальной эксплуатации пиролизного реактора, в первую очередь, по скорости нагрева и соотношению образец/объем реактора. При этом данные

кинетического анализа с трудом проецируются на реальное или даже экспериментальное оборудование, поэтому полученные результаты могут быть использованы только для оценки необходимого времени пребывания с обязательной экспериментальной верификацией.

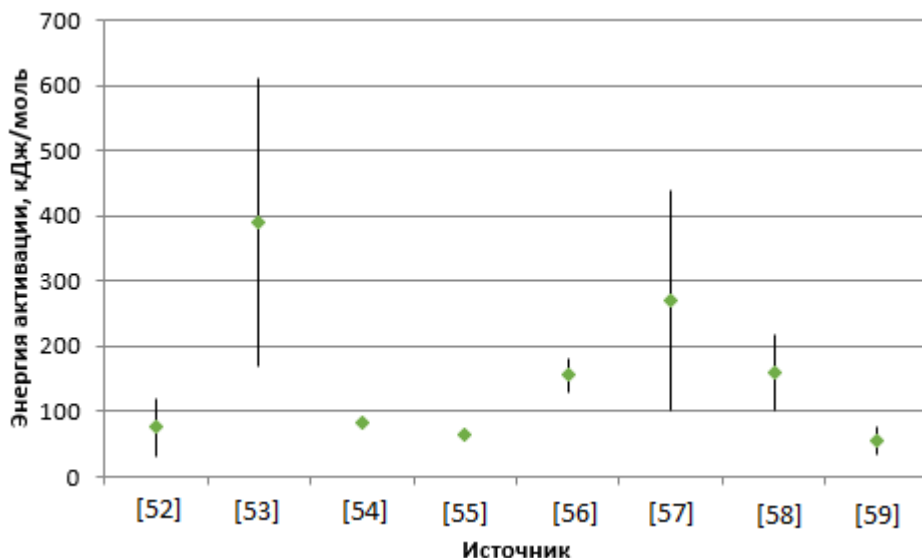


Рисунок 12 – Характерные диапазоны изменения

### 1.5.3 Влияние тепла и расхода среды

Расход инертной среды в реакторе оказывает влияние, схожее со временем пребывания [45], т. к. данные величины также определяет вероятность взаимодействия между газообразными и жидкими продуктами пиролиза. При этом эффект данного параметра менее существенный по сравнению с представленными ранее температурой, давлением и временем пребывания образца [60,61]. В частности, в [62,63] отмечается, что вторичные реакции в газовой и жидкой фазах с образованием твердых продуктов могут способствовать увеличению массы продукта в твердой фазе. Также данные реакции могут способствовать возникновению реакций в пористой структуре образца, тем самым воздействуя на морфологию полученного продукта, тем самым формируя отложения, закрывающие доступ к порам частиц, тем самым снижая его удельную поверхность и активность. Схожие эффекты наблюдались при сравнении процессов пиролиза в условиях вакуума [64] и пиролизом в условиях интенсивной продувки реактора. При этом условия вакуума способствовали быстрому выходу

летучих и, в результате, возникновению газофазных реакций за пределами частиц образца, в то время как пиролиз в условиях атмосферного и избыточного давления промотировал возникновение указанных реакций в объеме пор частиц твердофазного продукта реакции.

Эффект типа и расхода среды идентичен эффекту температуры и времени пребывания – по мере увеличения расхода и снижения интенсивности и вероятности взаимодействия газофазных продуктов пиролиза с твердофазными продуктами, а также с уменьшением времени их пребывания в высокотемпературной области.

При реализации процесса пиролиза в реакционной среде ( $\text{CO}_2$  или  $\text{H}_2\text{O}$ ) с увеличением её расхода наблюдался рост выхода газофазного продукта за счет твердого и жидкого продуктов [38]. При этом площадь удельной поверхности твердого продукта нелинейно возрастала [39], что было результатом активирующего действия газовой среды в реакторе. Данное направление представляет значительный интерес, благодаря упрощению процесса за счет сокращения числа ступеней конверсии до одного.

#### 1.5.4 Влияние скорости нагрева

Скорость нагрева оказывает преимущественное влияние на соотношение между жидкими и газофазными продуктами пиролиза: чем больше скорость нагрева – тем больше выход продукта в газовой фазе и меньше в жидкой [65,66], при этом влияние на выход твердой фазы было незначительным. Для условий медленного пиролиза – со скоростями нагрева менее  $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$  – непосредственно влияние скорости нагрева является достаточно слабым. При более высоких скоростях нагрева процессы пиролиза протекают [67], в среднем, при более высоких температурах, способствуя более полному разложению продуктов пиролиза до более легких углеводородов (для жидких продуктов). При этом с увеличением скорости нагрева увеличивается содержание низкомолекулярных компонент (метана, моно- и диоксида углерода) и снижается содержание высокомолекулярных соединений ( $\text{C}_3\text{H}_6$ ,  $\text{C}_4\text{H}_8$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ) [65] в газофазных продуктах. Также с ростом скорости нагрева наблюдалось увеличение содержания

ароматических соединений и спиртов при снижении содержания олефинов и парафинов [65]. При этом подобные изменения носят нелинейный характер, близкий к логарифмическому. При этом в [66] отмечается, что, в целом, выход сложных углеводородов снижается с увеличением скорости нагрева. В большинстве работ отмечается, что скорость нагрева может рассматриваться как производная от температуры процесса и времени пребывания топлива в реакторе даже для таких процессов. При этом, поскольку достижение таких скоростей нагрева проблематично в первую очередь из-за ограничений интенсивности нагрева, поэтому расчет подобных систем усложняется необходимостью учета характеристик теплообмена [68].

Скорость нагрева может рассматриваться как производная от температуры и времени пребывания, определяя температурный профиль образца в ходе нагрева. Несмотря на отдельные работы, публикующие данные по выходу твердофазного продукта до 50 масс.%, большинство работ оценивают выход твердой фазы в результате быстрого пиролиза на уровне 12-15 масс.% [36,51,64].

## **1.6 Постановка проблемы использования углеродного остатка пиролиза шин в энергетике**

Сложный состав и сшитая структура резины затрудняет ее рециклинг [69]. Переработка резиновых отходов является дорогостоящей, что делает использование их как вторичный энергетический ресурс более привлекательным [70].

Общемировой рынок технического углерода по прогнозам 2014 г. [71] к 2025 г. должен вырасти с 7,9 до 15 млн.т. Однако величина 13,9 млн.т, по ряду оценок, уже была достигнута в 2019 г. В 2020 г. общемировой рынок технического углерода оценивался в 15,5 млрд. долларов США.

Согласно данным Ростата, производство покрышек в России снижалось в течение 2017-2020 гг. (см. рис. 13). Несмотря на незначительный спад в 2019-2020 гг. ввиду коронавирусных ограничений и эффектов, объем потребления остается значительным. Объем рынка технического углерода в РФ в 2020 г. составил 265,5



тыс.т. [72], при этом экспорт составил 915 тыс.т., что оценивается в 423 млн. \$. Это свидетельствует о высоком экспортном потенциале данного продукта.

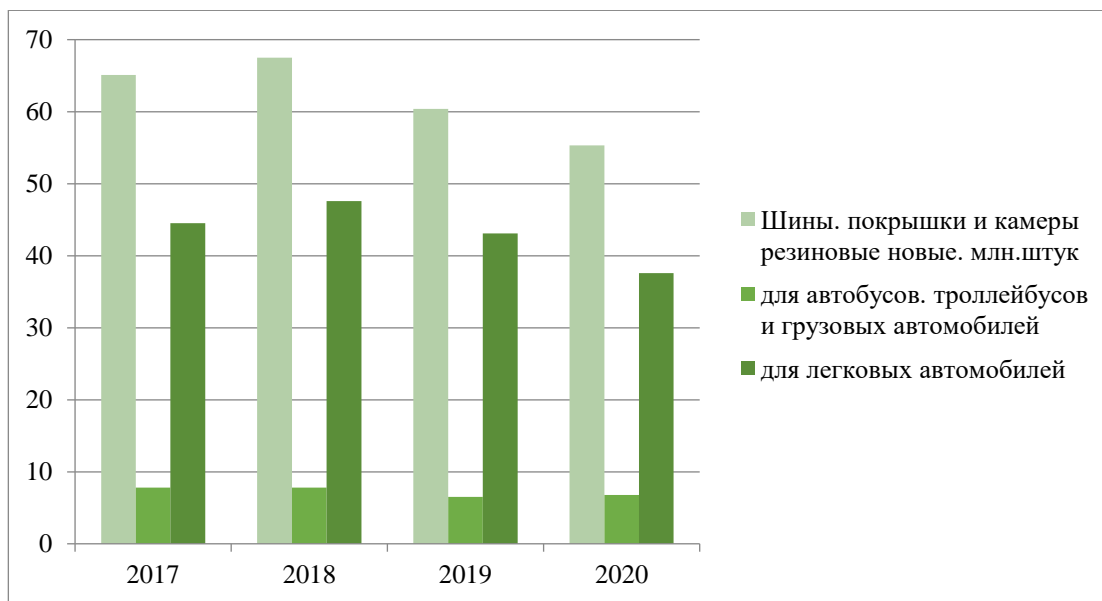


Рисунок 13 – Динамика изменения производства покрышек в России (млн.т) [73]

Несмотря на разнообразие свойств и марок технического углерода, используемого для производства покрышек согласно ГОСТ [74], достаточно сложно выделить общую наиболее востребованную марку технического углерода. Производство резиновых покрышек происходит с использованием активного углерода с высокой удельной поверхностью (более 75 м<sup>2</sup>/г) марок П234, П324, К354. Средняя цена на углерод марки П-324 (или N-330) с удельной поверхностью 78-88 м<sup>2</sup>/г в декабре 2021 г. [75] в Северной Америке составляла 2530 \$/т, в Европе – 1670 \$/т, в Азии – 1430 \$/т. В России актуальные цены на тот же период составляли порядка 900-1000 \$/т. При этом переход на марку выше (соответствующее среднему росту площади удельной поверхности на 10 м<sup>2</sup>/г) приводил к росту стоимости продукта на 15-20 % [76]. Наблюдается постоянный рост цены технического углерода на протяжении последних 10 лет – рис. 14.

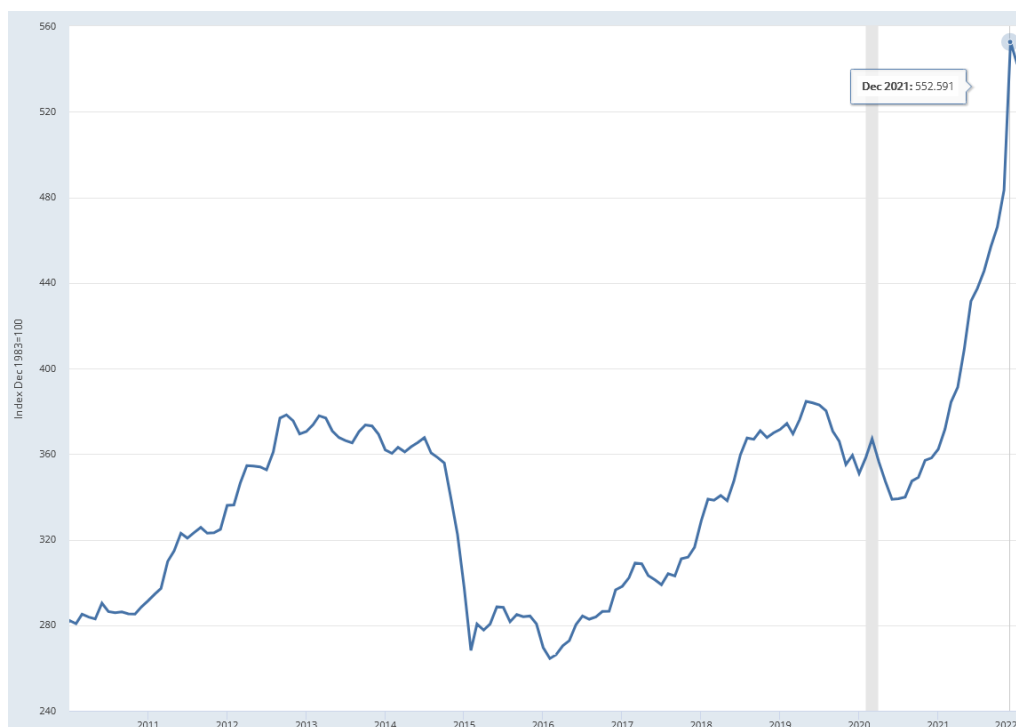


Рисунок 14 – Индекс цен на технический углерод в США относительно средней по рынку цены 1983 г. [77]

Таким образом, технический углерод – востребованный на рынке продукт, имеющий общемировой объем потребления порядка 15 млн.т. и 15 млрд. долларов соответственно. Средняя стоимость углерода марки П-324 составляет 2500 \$/т в США, 1700 \$/т в Европе, 1400 \$/т в Азии и 1000 \$/т в России. Так как, рост площади удельной поверхности продукта приводит к практически пропорциональному росту его стоимости, целесообразность такого повышения должна рассматриваться отдельно. Ввиду высокой стоимости, получение технического углерода, достаточных для использования в промышленности свойств, является приоритетной задачей. Ключевыми характеристиками являются удельная площадь поверхности, содержание золы и серы, а также показатели активности (например, йодное число, абсорбционные свойства и др.).

## 2 Методическое обеспечение работы

### 2.1 Характеризация используемых образцов

Технические характеристики (теплотворная способность, содержание влаги, золы и летучих веществ) определяли по стандартным методикам: ISO 1126:2015 «Ингредиенты для смешивания каучука – Технический углерод – Определение потерь при нагревании», ISO 1125:2015 «Ингредиенты резиновых смесей – Технический углерод – Определение зольности», ISO 562:2010 «Каменный уголь и кокс – Определение летучих веществ», ISO 1928:2020 «Уголь и кокс – Определение валовой теплотворной способности». Элементный состав определяли с помощью анализатора Vario Micro Cube CHNS (Elementar, Германия). Технические характеристики и определенный элементный состав представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-химические характеристики углеродного остатка

Параметр	Значение	Метод определения
Внешняя влага <sup>a</sup> , мас%	0,5	ISO 1126-2018
Зольность <sup>a</sup> , мас%	15,6	ГОСТ 25699.8-90
Выход летучих соединений <sup>a</sup> , мас%	8,8	ГОСТ Р 55660-2013
Теплота сгорания (низшая), МДж/кг	27,2	ГОСТ 147-2013 (калориметр АБК-1, Русские энергетические технологии, Россия)
Элементный состав <sup>a</sup> , мас%		
C	75,22	CHNS-анализатор Vario Micro Cube (Elementar, Германия).
H	0,77	
N	0,22	
S	3,21	

В качестве биомассы по отношению к углеродному остатку использовали торф (Суховское месторождение, Томская область, Россия) и сосновые опилки. Последний был получен от лесопромышленного предприятия ООО «Сибирский биоуголь» (г. Беляй, Томская обл., Россия). Перед аналитическими исследованиями образцы подвергали измельчению с помощью режущего стана, после чего следовало фракционирование на ситах размером ячеек 200 мкм.

В таблице 2 представлены технические характеристики и элементный состав используемых образцов биомассы. Содержание влаги, золы и летучих веществ, а также теплоты сгорания определяли с помощью ISO/FDIS 18134-3 «Твердое биотопливо — Определение содержания влаги — Часть 3: Влажность в общем анализе образца», ISO 18123 «Твердое биотопливо — Определение летучих веществ», ISO 18122:2022 «Твердое биотопливо — Определение зольности», ISO 18125:2017 «Твердое биотопливо — Определение теплотворной способности» соответственно. Элементный состав определяли так же, как и для образца углеродного остатка.

Таблица 2 – Физико-химические характеристики торфа и опилок

Образец	Влажность, $W^a$ , масс%	Зольность $A^d$ , масс%	Выход летучих соединений $V^{daf}$ , масс%	Теплота сгорания (низшая), МДж/кг	Элементный состав <sup>a</sup> , мас%				
					$C^d$	$H^d$	$N^d$	$S^d$	$O^d$
Торф	9.9	22.8	74.8	11.8	40.2	4.9	2.8	0.2	29.2
Опилки	7.0	1.6	83.4	18.1	51.7	6.5	0.2	–	40.1

## 2.2 Подготовка образцов

В качестве исходного образца твердого топлива был использован углеродный остаток, полученный в результате парового пиролиза гранулированных до 3-4 мм отработанных шин крупногабаритного транспортного средства специального назначения марки Белаз.

Полученный образец углеродного остатка подвергали механическому измельчению (с помощью шаровой мельницы) с последующим фракционированием в ситах с размером ячейки <80 мкм.

Применена частичная замена до 15 мас.% углеродного остатка, полученного пиролизом отработанных шин большегрузной техники, на сосновые опилки или торф. Топливные композиты (углеродный остаток/торф или сосновые опилки) подвергали механическому перемешиванию с различными массовыми

соотношениями (5-15 мас.%) до однородного состояния. Технические характеристики и элементный состав исследуемых топливных композитов были определены расчетным методом по принципу суперпозиции и представлены в таблице 5.

**Таблица 5.** Расчетные характеристики исследуемых топливных композитов.

Образец	Массовая доля влаги, %, $W^a$	Зольность, % $A^d$	Массовая доля летучих веществ, % $V^{daf}$	Теплотворная способность, МДж/кг $Q_i^r$	Элементный состав, %				
					C <sup>d</sup>	Чд д	H <sup>d</sup>	C <sup>d</sup>	O <sup>d</sup>
5% торфа	1.0	15.9	12.1	26.4	73.8	1.0	0.3	3.1	5.9
10% торфа	1.4	16.3	15.4	25.7	72.0	1.2	0.5	2.9	7.1
15% торфа	1.9	16.7	18.7	24.9	70.3	1.4	0.6	2.8	8.3
5% сосновых опилок	0.8	14.9	12.5	26.7	74.4	1.1	0.2	3.1	6.4
10% сосновых опилок	1.2	14.2	16.3	26.3	73.2	1.4	0.2	2.9	8.2
15% сосновых опилок	1.5	13.5	20.0	25.8	72.0	1.7	0.2	2.7	9.9

<sup>a</sup> – аналитическая масса, <sup>d</sup> – сухая масса, <sup>daf</sup> – сухая беззольная масса

### 2.3 Исследование процесса окисления

Термический анализ был использован для определения параметров окисления исследуемых образцов. Она проводилась с помощью анализатора STA 449 F5 Jupiter (Netzsch, Германия). Анализ проводили в тех же условиях при скорости нагрева 10 °С/мин в воздушной среде при расходе воздуха 150 мл/мин. Эксперименты проводились в диапазоне температур 50-800 °С. Масса исследуемого образца составила 10 мг.

### 2.4 Исследование процессов зажигания и горения

Методика проведения эксперимента включала несколько этапов. В терморегулируемой печи устанавливалась температура греющей среды  $T_g = 800$

°С. Далее топливная навеска массой  $\approx 0.1 \pm 0.01$  г помещалась с помощью цилиндрической формы на держатель координатного механизма, ход которого калибровался по заданной координате в центр камеры сгорания и приводился в действие с помощью персонального компьютера.

Исследование по воспламенению и горению проводилось с использованием экспериментальной установки для сжигания твердого топлива

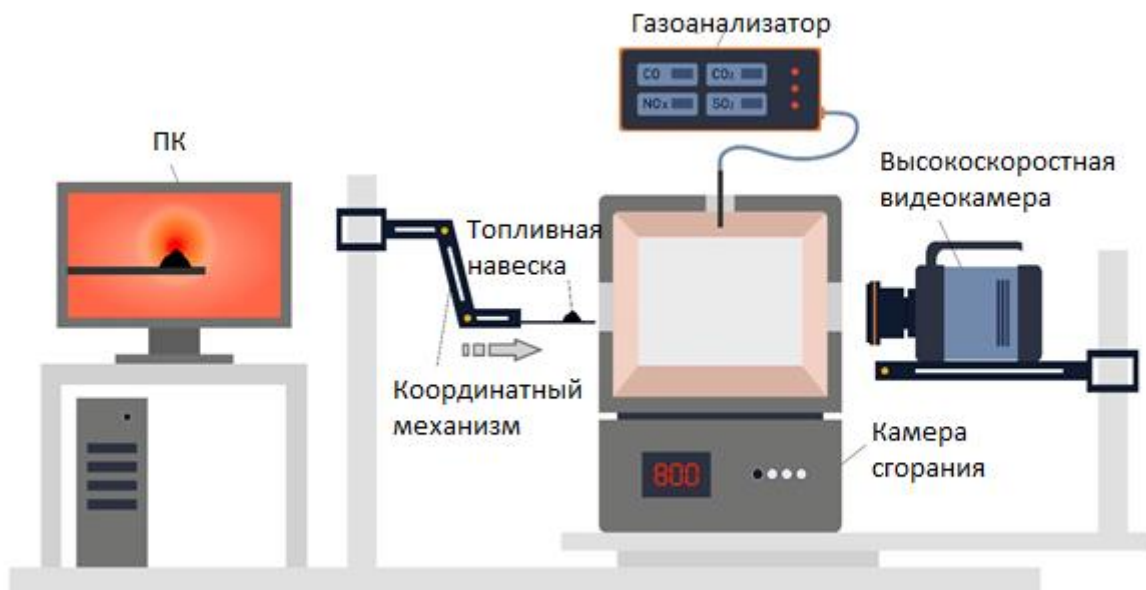


Рисунок 15 – Принципиальная схема установки

Исследуемое воспламенение и горение визуализировалось с помощью высокоскоростной камеры FastCam Mini UX100 (Photron, США). Реакционную способность исследуемых топлив и топливных смесей оценивали с помощью времени задержки воспламенения  $\tau_i$ , которое определяли с помощью этих записей.

## 2.5 Исследование газовых продуктов

Состав газофазных продуктов сгорания (CO, CO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub>) определяли с помощью проточного газоанализатора. Расход проходящих газов составил 3 л/мин, частота сканирования датчиков – 0,33 Гц.

После каждого измерения (с целью обеспечения точности измерений и полного удаления продуктов реакции из печи) газоанализатор и печь продувались

воздухом от компрессора. Для каждого образца было проведено не менее 10 повторных экспериментов.

### 3 Результаты экспериментальных исследований совместного сжигания углеродного остатка с нефтяным коксом и биомассой

#### 3.1 Термический анализ

На рисунке 16 представлены ТГ и ДТГ-профили исследуемых образцов углеродного остатка отработанных шин и топливных композитов на его основе.

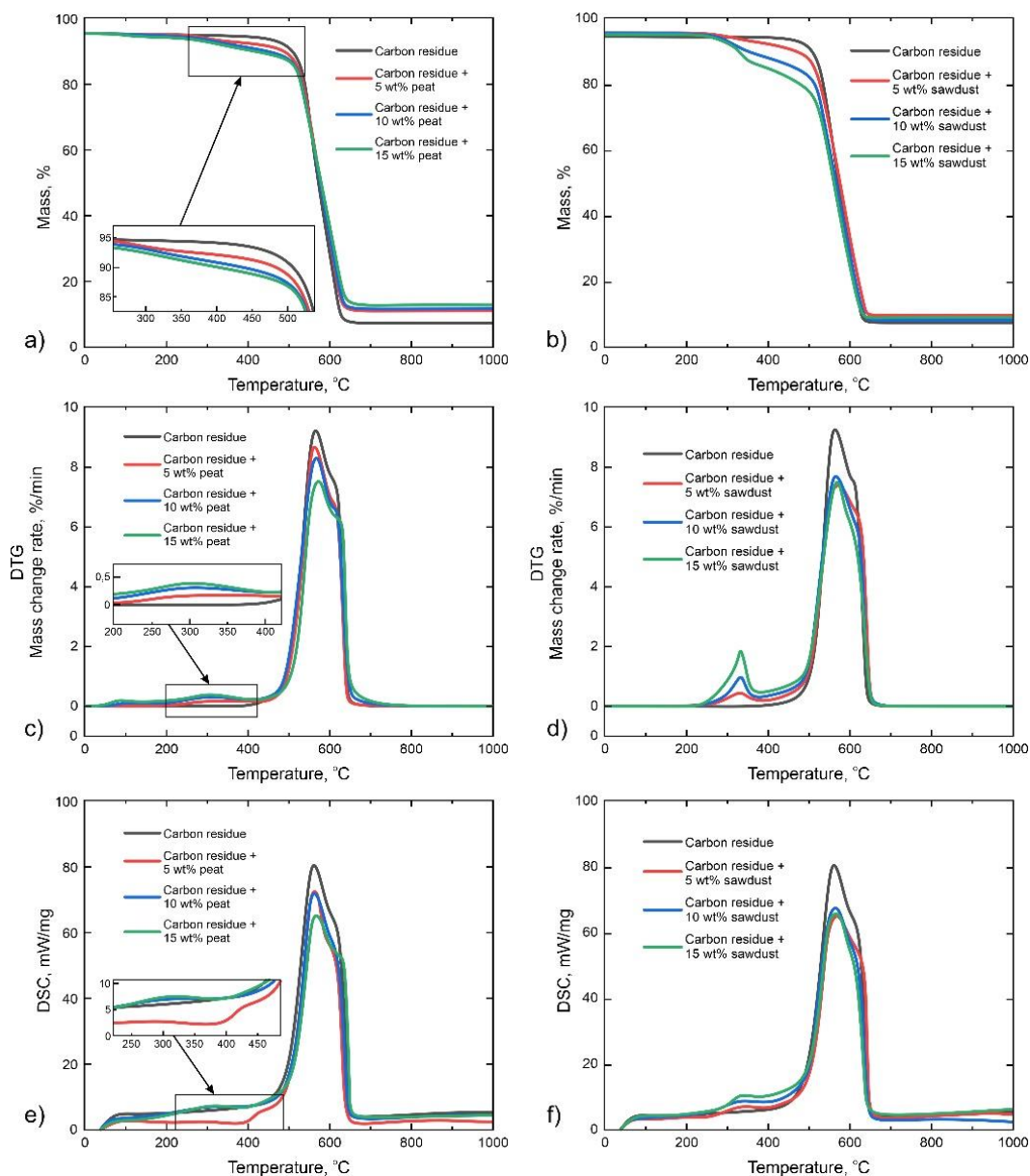


Рисунок 16 – ТГ (a, b), DTG (c, d) и DSC (e, f) профили окисления исследуемых образцов отработанных шин, пиролизного углеродного остатка и топливных композитов на его основе с различным содержанием торфа (a, c, e) и сосновых опилок (b, d, f). Расход воздуха – 150 мл/мин, скорость нагрева – 10 °С/мин.



Согласно рисунку 16, интенсивное окисление образцов отработанного углеродного остатка пиролиза шин происходило в интервале температур 510-636 °С ( $T_i$  и  $T_f$  соответственно – табл. 3). Добавление торфа оказывает существенное влияние на полноту окисления этой смеси. Так, увеличение доли торфа до 15 % в смеси привело к увеличению зольной массы на 4,1 %. Причиной этого является большая зольность торфа по сравнению с исследуемым углеродным остатком (22,8 и 15,5 % соответственно). Добавление опилок не оказало существенного влияния на полноту ее окисления (табл. 3).

Стоит отметить, что добавление биомассы (торфа или опилок) приводит к изменению формы профилей ТГ с более выраженной низкотемпературной областью окисления низкокипящих компонентов, таких как гемицеллюлоза (200-370 °С), целлюлоза (275-400 °С) и лигнин (более 400 °С). Значения начала интенсивного окисления хорошо соответствовали увеличению доли биомассы в топливном композите (табл. 3). Профиль углеродного остатка пиролиза отработанных шин имеет мономодальную форму с характерной максимальной температурой 565 °С и скоростью окисления 9,26 %/мин ( $T_{max}$  и  $w_{max}$  соответственно). Однако при добавлении биомассы появился дополнительный пик в виде характерного плеча основного профиля ДТГ с появлением явной фазы термического разложения в низкотемпературной зоне. Увеличение доли биомассы в составе приводило к снижению скорости интенсивного окисления в обоих случаях (на 0,6 и 1,7 %/мин соответственно), что было связано с увеличением скорости выделения летучих веществ в низкотемпературной области. Таким образом, добавление биомассы в состав топлива приводило к расширению области окисления влево в среднем на 8-30 °С и повышению максимальной температуры интенсивного окисления.

Такие результаты хорошо согласуются с литературными данными о совместном сжигании смесей углерода и биомассы [78], углерода и отходов [79], углерода и углерода [80–82] или углерода и биомассы [83]. Хотя взаимодействия между компонентами широко признаны [78–84] причины такого поведения еще предстоит определить из-за их чрезвычайной сложности. Вышеупомянутые

исследователи предположили, что возможной причиной являются различные скорости адсорбции кислорода [84], однако никаких доказательств представлено не было. Взаимодействие между выделяемыми летучими веществами и твердофазными компонентами топлива считается ключевым фактором этого процесса, так как различное содержание летучих веществ и особенности стадии его высвобождения были наиболее четкими различиями между поведением торфа и опилок по результатам термического анализа.

Таблица 3 – Параметры окисления угольных и топливных композиций методом термического анализа.

Компонент	Масса, мас.%	$T_i$ , °C	$T_f$ , °C	$w_{\text{макс.}}$ , %/МИН	$T_{\text{max}}$ , °C	$\delta m$ , %
Углеродный остаток	100	-/510.3	-/635.5	9.26	565.1	91.52.
Торф	5	302.5/515.1	471.1/632.5	8.69	562.5	88.02
	10	277.5/505.1	460.6/630.4	8.31	567.5	87.4
	15	272.5/502.5	452.5/635.1	7.55	570.1	86.11
Сосновые опилки	5	325/507.5	472.5/637.5	0.6/7.4	335/575	89.66
	10	320.1/500.1	447.5/632	1.22/7.7	335/567.5	91.45
	15	317.5/502.5	452.5/627.5	1.87/7.5	332/570.1	90.52

Исходя из вышеизложенного, можно отметить, что применение биомассы в виде торфа и сосновых опилок не приводило к существенным сдвигам температурных характеристик окисления углеродного остатка. Этот результат позволяет сделать вывод о том, что происходит стабильное горение, излучение и теплоотдача к теплообменным поверхностям, независимо от доли органической составляющей в номинальном режиме работы оборудования.

### 3.2 Зажигание и горение

На рисунке 5 представлены результаты определения времени задержки  $\tau_i$  исследуемых образцов с использованием при температуре 800 °C теплоносителя в камере сгорания.

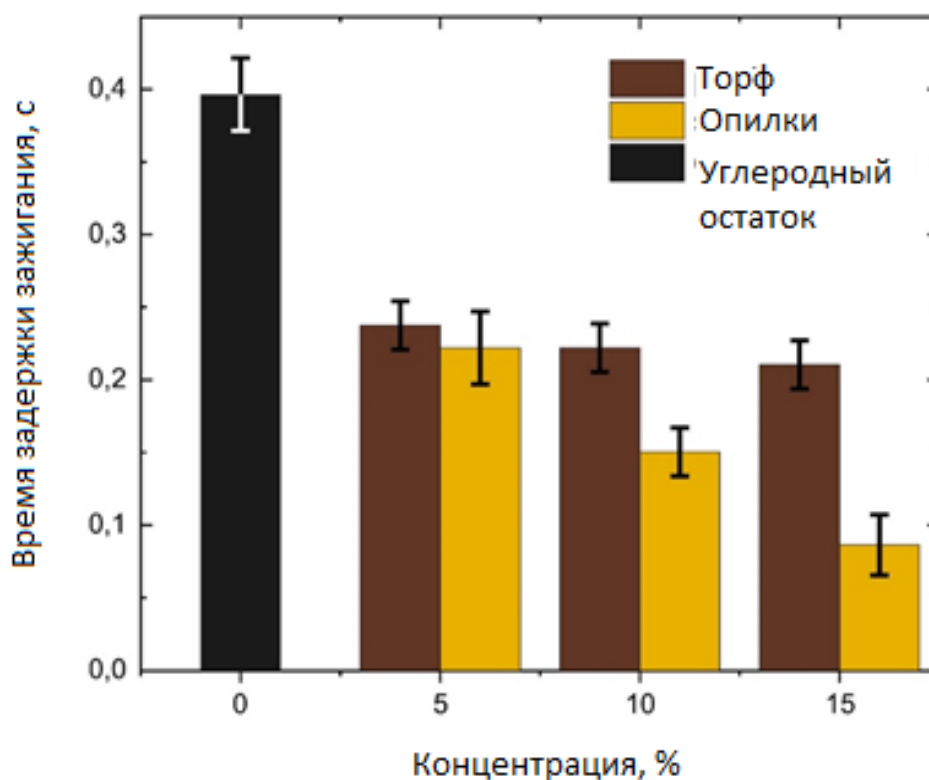


Рисунок 17 – Время задержки зажигания исследуемых образцов топлива при температуре теплоносителя  $T_g = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Согласно данным рисунка 17, увеличение содержания биомассы в виде торфа и сосновых опилок в топливном композите привело к нелинейному сокращению времени задержки воспламенения по сравнению с эталонным образцом углеродного остатка пиролиза отработанных шин. Внесение 5 мас.% добавки торфа или опилок привело к резкому снижению времени задержки воспламенения примерно на 40 % с  $\sim 0,4$  с до 0,24 с. Разница между торфом и опилками при такой концентрации была незначительной. Дальнейшее увеличение концентрации торфяной добавки не приводило к сколько-нибудь сильному эффекту – время задержки воспламенения образца с 15 мас.% торфа было меньше, чем время задержки воспламенения образца с 5 мас.% менее чем на 5 %. Напротив, увеличение концентрации добавки к опилкам с 5 мас.% до 15 мас.% привело к уменьшению времени задержки воспламенения примерно в 2,5 раза. По сравнению с исходным образцом наиболее сильный эффект был достигнут при добавлении сосновых опилок (от 44 до 78 % в зависимости от содержания).

Снижение параметра  $t_i$  объяснялось повышением реакционной способности этой смеси за счет достоверно более высокого содержания летучих веществ (на 9,4 мас.%), более низкой влажности (на 2,9 мас.%) и более высокой общей реакционной способности опилок при воспламенении (табл. 5). Последнее может быть вызвано более высоким содержанием гемицеллюлозы и целлюлозы в опилках по сравнению с торфом, который имеет высокое содержание менее реакционноспособного лигнина.

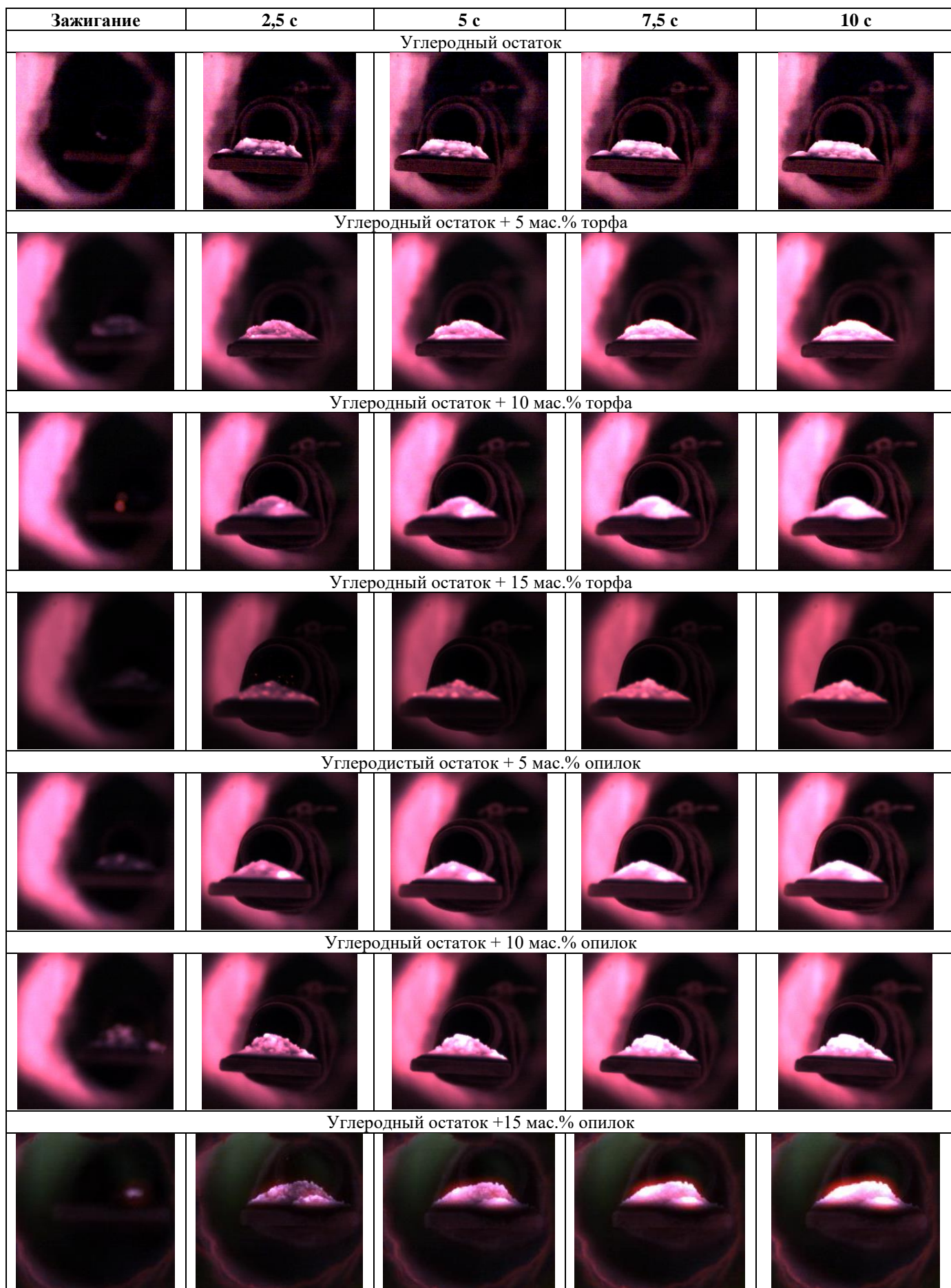


Рисунок 18 – Изображения типичных стадий исследуемого воспламенения и горения топлива.

На рисунке 18 представлены типичные кадры воспламенения и последующего сгорания образцов топлива. С помощью представленных изображений можно выделить несколько стадий процесса горения. Первые, которые обычно выделяют в литературе [85] – инертный нагрев и влагоудаление – на рисунке 18 не представлены. Последние стадии – одновременное выделение и сгорание летучих веществ с твердым окислением углерода – происходили в момент воспламенения. Воспламенение в этом случае может быть охарактеризовано следующим механизмом: летучие вещества (в основном состоящие из органического происхождения, такого как гемицеллюлоза, целлюлоза и лигнин) образуют газовое облако в непосредственной близости от образца топлива, которое нагревает топливо, тем самым способствуя стабильному сгоранию топлива. Полученные результаты хорошо согласуются с данными термического анализа (рис. 16), который выявил дополнительную экзотермическую реакцию разложения органического компонента в низкотемпературной зоне. Свечение в момент воспламенения локализовалось либо сверху, либо в основной массе образца. Это свидетельствует о значительном вкладе как гетерогенных реакций на поверхности образца, так и гомогенных реакций в его окрестностях. Интенсивность свечения со временем увеличивается, а его распределение становится более равномерным. В то время как вклад газофазных реакций вблизи поверхности образца увеличивается с содержанием летучих веществ в смеси, распределение свечения для образцов с более высоким содержанием добавок было более равномерным. Однако этот эффект был довольно слабым.

Механизм воспламенения образцов, содержащих торф, был аналогичен механизму проб с опилками, но характеризовался менее интенсивным выделением тепла на начальной стадии термического разложения топлива. Это также согласуется с данными термического анализа (рис. 16). Также стоит отметить, что увеличение содержания торфа свыше 5 мас.% в топливном композите не приводило к существенному сокращению времени задержки воспламенения. В то время как время задержки воспламенения для образцов с 5 мас.% добавок было

довольно близким, а для образцов с 15 мас.% добавок было обратное (время задержки воспламенения для образца с 15 мас.% торфа было почти в три раза выше, чем для образца с 15 мас.% опилок), общие особенности горения по данным видеофиксации (рис. 18) были весьма схожи для всех из них, что указывает на значительный вклад добавки с точки зрения повышения реакционной способности без воздействия на общий механизм.

### 3.3 Анализ продуктов сгорания

На рисунке 19 представлены профили, характеризующие выделение газофазных продуктов сгорания ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_2$ ) исследуемых образцов топливных композитов на основе отработанных шин, пиролизного углеродного остатка и добавок биомассы в виде торфа и сосновых опилок.

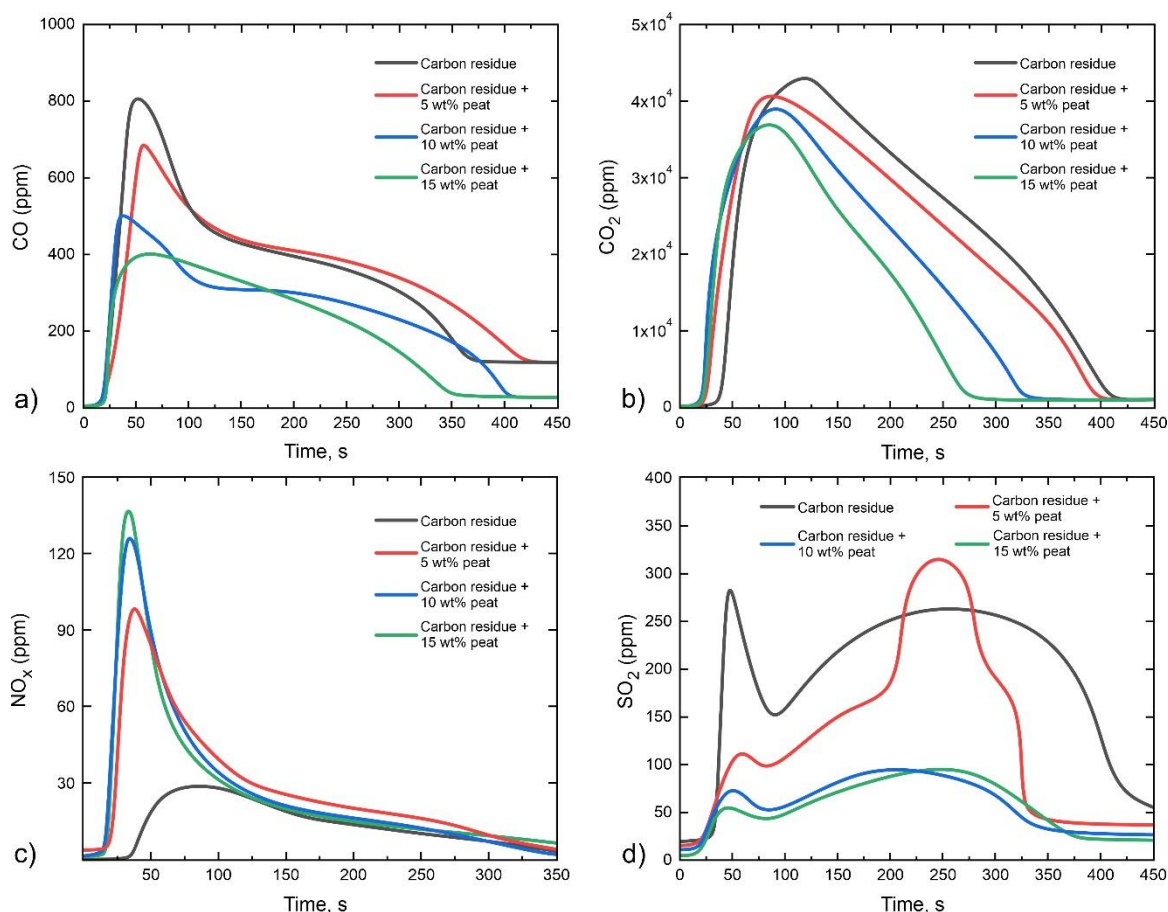


Рисунок 19 – Выявлены зависимости выделения газофазных продуктов сгорания по времени для исследуемых образцов углеродного остатка пиролиза отработанных шин и топливных составов с торфяной добавкой: а – оксид углерода, б – диоксид углерода, с – оксид азота, d – оксид серы.

Анализ данных, представленных на рис.19, позволяет выявить существенное влияние торфа на характер образования газофазных продуктов горения. С увеличением содержания торфа в топливном композите наблюдается снижение интенсивности образования окиси углерода, что соответствовало элементному составу исходных компонентов, в частности, более низкое содержание углерода как в опилках, так и в торфе по сравнению с углеродным остатком. Однако увеличение наблюдаемых пиковых концентраций оксидов азота было связано с интенсификацией скорости сгорания топливного композита. Таким образом, увеличение пиковой концентрации оксидов азота в образцах пиролизных углеродных остатков отработанных шин с торфяной добавкой может быть связано с интенсивным образованием термических оксидов азота на начальной стадии горения.

Профили концентраций оксида серы имели бимодальную форму с очевидной тенденцией снижения выбросов с увеличением доли компонентов биомассы. Наибольший эффект был достигнут на стадии сжигания углеродного остатка и выражался как в общем сужении диапазона выбросов (начиная с 5 мас.% торфяной добавки), так и в снижении пиковых концентраций. Также было замечено, что при более высоких концентрациях торфяной добавки эти эффекты были сильнее. Снижение концентрации оксидов серы было вызвано ее связыванием и консервацией в твердом виде в зольный остаток.

По графикам видно, что влияние термического азота на общие выбросы оксидов азота практически не зависит от концентрации и типа добавки к биомассе. Существенным выводом из представленных данных является то, что добавка 5 мас.% в виде торфа и 10 мас.% добавка в виде сосновых опилок была оптимальной для получения топлива с низким уровнем выбросов оксидов серы. Установлено, что дальнейшее увеличение присадки к топливу оказывает слабое влияние на экологические характеристики такого топлива, но, по результатам термического анализа, оказывает более сильное негативное влияние на энергетическую ценность топливного композита. Изменение выбросов СО может быть связано с различной реакционной способностью компонентов летучих



веществ. Основным механизмом сокращения выбросов  $\text{CO}_2$  объясняется более низким содержанием серы в биомассе, несмотря на небольшие синергетические эффекты, которые можно объяснить взаимодействием между компонентами золы и продуктами сгорания в газовой фазе.

**ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ  
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Обучающемуся:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5БМ11	Губин Артур Владимирович

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>НОЦ И.Н. Бутакова</b>
<b>Уровень образования</b>	магистратура	<b>Направление/ООП/О ПОП</b>	Экологически чистые технологии преобразования энергоносителей

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Месячный оклад руководителя – 30000 руб.; инженера – 20000 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Районный коэффициент равен 1,3; накладные расходы принимаются в размере 70 % от заработной платы.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисление в социальные фонды 30,7 % от фонда заработной платы

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения научного исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Планирование работ и оценка их выполнения
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Составление сметы затрат на научное исследование
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение себестоимости научного исследования на базе НИ ТПУ

**Перечень графического материала:**

1. ...Диаграмма Ганта

Дата выдачи задания к разделу в соответствии с календарным учебным графиком

**Задание выдал консультант по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент (ОСГН, ШБИП)	Маланина Вероника Анатольевна	Кандидат экономических наук		

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ11	Губин Артур Владимирович		

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность**

Цель дипломной работы: исследование установок пиролиза изношенной резины в качестве топлива.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является экономическое обоснование проекта по установке оборудования для пиролиза резинотехнических изделий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести SWOT-анализ для выявления сильных и слабых сторон проекта;
- произвести планирование научно-исследовательских работ;
- определить бюджет научного проекта;
- определить финансовую, социальную и сравнительную эффективность проекта.

### **4.1 Предпроектный анализ**

#### **4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Потенциальными потребителями результатов проекта могут быть предприятия с большим количеством отработанной резины, все возможные мусорные полигоны с сортировкой резины, либо теплоэлектростанции, на которые могут усовершенствовать топливный цикл смешивая углеродный остаток пиролиза отработанных шин с биомассой.

#### **4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Сейчас изношенные резинотехнические изделия отправляют на свалку, просто сжигают (что является токсичным), механически измельчают в резиновую крошку и используют как строительный материал (второсортный материал и не везде необходим), и переработка в топливо пиролизом.

Стандартные топки имеют низкий КПД, требуют регулярной очистки и

ремонт, а в атмосферу в виде дыма выбрасываются не сгоревшие сложные и вредные углеводородные соединения, и зольная пыль.

Актуальность данного исследования направлено на использование смеси углеродного остатка пиролиза отработанных шин в теплофикационных установках сжигания топлива для снижения выбросов токсичных газов.

Полученные результаты проведенного исследования позволяют повысить эффективность сжигания изношенной резины за счет добавления биомассы.

#### 4.1.3 SWOT – анализ проекта

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта.

SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. С помощью SWOT-анализа возможно определить внутренние сильные и слабые стороны проекта, что позволяет оптимальным образом оценить его преимущества и недостатки. Кроме того, по своей структуре, SWOT-анализ позволяет сформулировать внешние факторы, влияющие на развитие проекта

Возможности представляют собой предпочтительные ситуации в настоящем и в будущем, возникающие в окружающей среде проекта. В противовес возможностям определяются угрозы, представляющие нежелательную ситуацию в окружающей среде проекта, способствующую его разрушению или препятствующую развитию.

Пересечения внутренних и внешних факторов позволяют определить основные исходы их сочетания, а также продемонстрировать корреляцию тех или иных внутренних факторов с различными условиями внешней, для проекта, среды. В таблице 4.2 представлены основные факторы, которые целесообразно учитывать в SWOT-анализе данного исследования:

SWOT- анализ проекта представлен в таблице 4.

Таблица 4 – SWOT- анализ проекта

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С1 – Возможность снижения выбросов CO<sub>2</sub> от сжигания биомассы;</p> <p>С2 – Длительный срок эксплуатации;</p> <p>С3 – Высокая эффективность работы (за счет совместного сжигания);</p> <p>С4 – Высокая точность обработки данных;</p> <p>С5 – Малые габариты оборудования;</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1 – Высокая стоимость оборудования;</p> <p>Сл2 – Низкая ремонтпригодность;</p> <p>Сл3 – Необходимость квалифицированных специалистов для обслуживания оборудования;</p> <p>Сл4 – Усложнение схем и способов регулирования системы;</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1 – Государственная поддержка проектов по модернизации объектов промышленности;</p> <p>В2 – Использование оборудования отечественного производителя;</p> <p>В3 – Создание унифицированных проектов переоснащения оборудования теплоэлектростанций типовых схем;</p> <p>В4 – Снижение стоимости электроэнергии;</p>	<p>Сильные стороны и возможности:</p> <p>1) Привлечение государственных и частных средств на модернизацию объектов энергетики;</p> <p>2) Увеличение мощности станций, использующих установки, приведет к еще более сильному снижению цен на электричество и потребует ввода дополнительных мощностей.;</p> <p>3) Увеличение мощности приведет к увеличению персонала станции.</p>	<p>Слабые стороны и возможности:</p> <p>1) Высокая стоимость проектов затрудняет повсеместное внедрение установок, ситуацию может улучшить государственное субсидирование проектов по перевооружению оборудования.</p> <p>2) Применение оборудования отечественных производителей, а также государственное субсидирование позволит снизить стоимость на печи и газоочистное оборудования,</p> <p>3) Унификация и стандартизация проектов позволит упростить процесс проектирования, повысится совместимость и взаимозаменяемость оборудования.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1 – Рост стоимости импортных комплектующих;</p> <p>У2 – Появление новых конкурентных технических решений;</p> <p>У3 – Низкий спрос на рынке, обусловленный экономической ситуацией;</p> <p>У4 – Инертность рынка на переоснащение оборудования работающем на базе новых технологий.</p>	<p>Сильные стороны и угрозы:</p> <p>1) Повышение стоимости импортного оборудования способствует повышению спроса на отечественное оборудование, а также развитию местного производства;</p> <p>2) Снижение интенсивности спроса помимо убытка, будет способствовать развитию экономических стратегий по разработке технических решений в будущем.</p>	<p>Слабые стороны и угрозы:</p> <p>1) Наличие установок, работающих на повышенном давлении, увеличивает вероятность крупной аварии</p> <p>2) Вследствие задержки между разработками и поступлением на рынок оборудования на базе новых технологий велика вероятность коммерческой неудачи вследствие малого спроса.</p>

Проанализировав характер НТР можно сделать вывод, о том, что наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия совместной предпринимательской деятельности. Совместная предпринимательская деятельность – это стратегия, которая основана на соединении общих усилий фирмы с коммерческими предприятиями страны-партнера для создания производственных и маркетинговых мощностей.

## 4.2 Инициация проекта

### 4.2.1 Цели и результат проекта

В таблице 5 представлены цели и результаты проекта

Таблица 5 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	1. Утилизация изношенной резины 2. Снижение выхода токсичных продуктов за счет совместного сжигания с биомассой
Ожидаемые результаты проекта:	Перевод проекта из статуса учебного в статус производственного.
Критерии приемки результата проекта:	Получение одобрительной рецензии на учебный проект от руководителей ТЭЦ.
Требования к результату проекта:	Должны быть представлены экспериментальные данные и их анализ для введения его в топливный цикл ТЭЦ с ПГУ.

Так как проект является учебным, то ожидаемым результатом проекта является защита, в составе комиссии, которой, должны присутствовать руководящие работники ТЭЦ. Критерием приемки будут считаться допуск к защите проекта и положительные рецензии руководителя и производителей.

В таблице 6 представлены заинтересованные стороны проекта.

Таблица 6 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Магистрант	Защита дипломного проекта
Руководитель	Реализация проекта с новой идеей
Руководитель ПГУ-ТЭЦ	Возможность взять проект на реализацию

Заинтересованными сторонами проекта выступают: исполнитель проекта (магистрант), руководитель проекта, руководители ТЭЦ. Для руководства теплоэлектростанций это возможность увидеть новые возможности модернизации, а также, перспективных студентов – потенциальных работников.

#### 4.2.2 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Рабочая группа проекта

№	Роль в проектк	Функции	Трудозатраты, час
1	Инженер	Выполнение заданий руководителя в полном объеме	3544
2	Руководитель	Руководство проектом	260

Проект студенческий, поэтому рабочая группа проекта состоит из руководителя проекта и исполнителя проекта.



## 4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

### 4.3.1 План проекта

Составим календарный график выполнения проекта (таблица 8).

Таблица 8 – Календарь план-график выполнения проекта

Ход работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление технического задания	15	09.01.2023 г.	23.01.2023 г.	Руководитель
2	Выполнение серии экспериментов по сжиганию изношенной резины и биомассы	126	23.01.2023 г.	01.06.2023 г.	Исполнитель
3	Обработка экспериментальных данных	61	01.09.2023 г.	01.11.2023 г.	Исполнитель
4	Изучение технической документации	60	01.11.2023 г.	31.12.2023 г.	Исполнитель
5	Определение технических характеристик топлива	90	01.01.2024 г.	31.03.2024 г.	Исполнитель
6	Разработка раздела «социальная ответственность»	30	01.04.2024 г.	31.03.2024 г.	Исполнитель
7	Разработка раздела «финансовый менеджмент»	15	01.05.2024 г.	15.05.2024 г.	Исполнитель
8	Разработка части проекта на иностранном языке	30	01.05.2024 г.	30.05.2024 г.	Исполнитель
9	Получение допуска проекта к защите	30	25.05.2024 г.	05.06.2024 г.	Исполнитель
10	Защита проекта	1	10.06.2024 г.	10.06.2024 г.	Исполнитель

Календарный план представлен 10-ю пунктами. Большая часть работ к текущему моменту уже закончена. Календарный план в дальнейшем представлен диаграммой Гантта (таблица 9) для упрощения работы с ним.

Таблица 9 – Диаграмма Гантта

Код работы	Вид работы	Исполнитель	Т <sub>кол</sub> календарных дней	Продолжительность выполнения работ															
				янв.23	фев.23	мар.23	апр.23	май.23	июн.23	сен.23	окт.23	ноя.23	дек.23	янв.24	фев.24	мар.24	апр.24	май.24	июн.24
1	Составление технического задания	Руководитель	15																
2	Выполнение серии экспериментов по сжиганию изношенной резины и биомассы	Исполнитель	126																
3	Обработка экспериментальных данных	Исполнитель	61																
4	Изучение технической документации	Исполнитель	60																
5	Определение технических характеристик топлива	Исполнитель	90																
6	Разработка раздела «социальная ответственность»	Исполнитель	30																

7	Разработка раздела «финансовый менеджмент»	Исполнитель	15																
8	Разработка части проекта на иностранном языке	Исполнитель	30																
9	Получение допуска проекта к защите	Исполнитель	30																
10	Защита проекта	Исполнитель	1																

По диаграмме Гантта видно, что выполнение экспериментов является самым продолжительным видом работ.

#### 4.3.2 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы; – дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

##### 4.3.2.1 Расчёт материальных затрат на выполнение ВКР

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх.}i}$$

где:

$m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх.}i}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении ВКР

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов;

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Основные работы для ВКР проводились за персональным компьютером и на лабораторной установке, находящейся в лаборатории

университета. Время, проведенное за работой у компьютера, примем равным 350 часам, мощность компьютера 0,4 кВт. Выполнение экспериментов на лабораторном стенде, мощность которого составляет 1 кВт, время работы 100 часов.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{\text{эл}} \cdot (P_{\text{к}} \cdot T_{\text{к}} + P_{\text{л}} \cdot T_{\text{л}}) = 2,56 \cdot (0,4 \cdot 350 + 1 \cdot 100) = 614,4 \text{ руб,}$$

где:

$C_{\text{эл}}$  – одноставочный тариф на электроэнергию для населения, проживающего в городских населенных пунктах Томской области в домах, оборудованных в установленном порядке электрическими плитами (2,56 руб. за 1 кВт·ч);

$P$  – мощность оборудования, кВт;

$T$  – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 614,4 рубля.

Все затраты сведём в таблицу 16.

Таблица 10 – Материальные затраты на выполнение ВКР

Наименование	Ед. Измерения	Количество	Цена за ед., руб	Затраты, руб
Эл. энергия	кВт·ч	240	2,45	614,4
Доступ в интернет	Мес.	2	650	1300
Транспортно-заготовительные работы (5 %)				95,72
ИТОГО по статье материальных затрат				2010,1

#### 4.3.2.2 Расчёт основной заработной платы

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада. Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением ВКР, (включая премии, доплаты) и

дополнительную заработную плату:

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где:

$Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

где:

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

где:

$Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн..

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 48 раб. дней  $M=10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_b \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p,$$

где:

$Z_b$  – базовый оклад, руб.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{тс}$ );

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2-0,5 (в НИИ на промышленных предприятиях условия: 15-20 % от  $Z_{тс}$ );

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 в г. Томск.

Расчёт заработной платы для руководителя:

$$З_m = З_б \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 30000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 39000 \text{руб.};$$

$$З_{дн} = \frac{З_m}{F_d} = 2785,71 \text{руб.};$$

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p = 2785,71 \cdot 15 = 41785,71 \text{руб.},$$

Результаты расчётов представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Зб, руб.	Зм, руб.	Здн, руб.	Тр, дни	Зосн, руб.
Руководитель	30000	58500	2785,71	15	41785,71
Инженер	20000	39000	1857,14	442	820857,1
ИТОГИ					862642,9

В таблице 4.10 продемонстрировано, что основная зарплата инженера в 13 раз, больше зарплаты руководителя, т.к. практически все работы выполняются именно инженером. Из этого следует, что основная доля отчислений во внебюджетные фонды, накладных расходов будут так же приходиться на него.

#### 4.3.2.3 Расчёт дополнительной заработной платы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется последующей формуле (для руководителя):

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн} = 0,15 \cdot 40378,5 = 6056,7 \text{руб.},$$

где:

$k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии

проектирования принимается 0,1-0,15).

Результаты расчётов представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Расчёт дополнительной заработной платы

Исполнители	Основная ЗП, руб.	Доп. ЗП, руб.
Научный руководитель	41785,71	6267,857
Инженер	820857,1	123128,6
ИТОГО		129396,4

#### 4.3.2.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Отчисления во внебюджетные фонды являются обязательными по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы (для руководителя):

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,307 \cdot (27857,14 + 4178,57) = 9834,96 \text{ руб.},$$

где:

$k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Таблица 13 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	Внебюджетные фонды, руб.
Научный руководитель	14752,44643
Инженер	289803,6143
ИТОГО	304556,0607



#### 4.2.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы составляют 16 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы (магистрант). Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,7 \cdot (521244,3 + 78186,6) = 95909 \text{ руб.},$$

где:

$k_{\text{накл}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Таблица 14 – Накладные расходы

Исполнители	Накладные расходы, руб.
Научный руководитель	33637,5
Инженер	660790
ИТОГО	694427,5

#### 4.2.3.6 Амортизационные отчисления

Для оборудования рассчитывается величину годовой амортизации по следующей формуле:

$$A_{\text{год}} = \frac{C_{\text{перв}}}{T_{\text{пи}}} = \frac{3000000}{20} = 150000 \text{ руб.},$$

где:

$C_{\text{перв}}$  – первоначальная стоимость, руб.;

$T_{\text{пи}}$  – время полезного использования, год.

Таблица 15 – Затраты на оборудование

Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Сумма амортизационных отчислений, руб.
Установка	1	3000000	150000

#### 4.2.3.7 Формирование бюджета затрат ВКР

Расчитанная величина затрат ВКР является основой для формирования бюджета затрат проекта. Определение бюджета затрат на ВКР по каждому варианту исполнения приведено в таблице 4.14.

Таблица 16 – Расчет бюджета затрат ВКР

Наименование статьи	Сумма, руб	Удельный вес, %
Материальные затраты	2010,1	0,039
Затраты по основной ЗП	862642,86	16,77
Затраты по дополнительной ЗП	129396,4	2,52
Внебюджетные отчисления	304556,1	5,92
Накладные расходы	694427,5	13,5
Цена оборудования	3000000	58,33
Амортизационные отчисления	150000	2,92
<b>ИТОГО</b>	<b>5143032,96</b>	<b>100</b>

Исходя из проведённых расчётов можно сделать вывод, что основные затраты проекта приходятся на заработную плату и оборудование.

### 4.3 Определение финансовой, социальной и сравнительной эффективности исследования

#### 4.3.1 Оценка социальной эффективности проекта

Социальная эффективность проекта учитывает социальные эффекты после осуществления проекта, как для конкретной единицы оборудования, компании, так и для смежных единиц.

Оценка социальной эффективности приведена в таблице 17.

Таблица 17 – Критерии социальной эффективности проекта

До	После
Высокая цена топлива.	Снижение стоимости используемого топлива уменьшает финансовые расходы на сырьё.
Большие затраты на дефектацию, как следствие увеличение загрязнения (отходы в результате дефектации).	Возможность дефектации без вскрытия корпуса, как следствие, уменьшение загрязненной ветоши, металлических отходов, человеческих трудозатрат.
Вскрытие корпуса во время ремонта, влечет за собой большое количество отходов.	Возможность провести дефектацию без вскрытия сокращает затраты на ремонт и уменьшает расход человеко-часов.
Большое количество дефектных деталей влечёт за собой увеличение отходов деталей.	Новое оборудование не требует затрат при ремонтах в ближайшие годы.
Большие затраты на собственные нужды.	Снижение затрат на собственные нужды входит в политику бережливого производства компании, работники станции получают материальные стимуляции за выполнение обязанностей.
Устаревшее оборудование.	Установка нового оборудования влечет создание новых рабочих мест.

По приведённой выше таблице можно сделать вывод, что проект в полной мере удовлетворяет потребности и интересы потребителя.

#### 4.3.2 Оценка сравнительной эффективности проекта

Сравним эффективность текущего проекта и аналогов по следующим

критериям: интегральный финансовый показатель разработки, интегральный показатель ресурсоэффективности разработки, интегральный показатель эффективности, сравнительная эффективность вариантов разработки.

Интегральный показатель эффективности позволяет оценить проект с точки зрения двух величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности. Интегральный финансовый показатель разработки определяется как (для текущего проекта):

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{3000000}{3000000} = 1,$$

где:

$I_{\Phi}^p$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения проекта, руб.;

$\Phi_{pi}$  – стоимость i-го варианта исполнения, руб.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения проекта можно определить (для текущего проекта):

$$I_T^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p = 5 \cdot 0,025 \cdot 2 + 5 \cdot 0,1 \cdot 2 + 5 \cdot 0,05 \cdot 2 + 5 \cdot 0,3 \cdot 2 = 4,75,$$

где:

$I_T^p$  – интегральный показатель ресурсоэффективности проекта;

$a_i$  – весовой коэффициент i-го параметра;

$b_i^p$  – бальная оценка i-го параметра для аналога и разработки.

Составим таблицу для определения интегрального показателя ресурсоэффективности (таблица 4.16).

где:

Текущий проект - техническое решение №1 (установка разработанной установки сжигания топлива);

Аналог 1 - техническое решение №2 (установка с конвективным нагревом);

Аналог 2 - техническое решение №3 (термический реактор);

Таблица 18 – Сравнительная оценка вариантов исполнения проектов

Критерии оценки	Вес коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
Легкость монтажа	0,025	5	5	5
Капиталовложения на монтаж	0,1	5	5	5
Экономия на дефектацию	0,05	5	0	5
Надежность	0,05	5	5	5
Удобство эксплуатации	0,025	5	5	5
Цена оборудования	0,1	5	3	5
Снижение затрат на тех. процесс	0,3	5	0	5
Повышение эко показателей станции	0,3	5	2	3
ИТОГО	1	40	25	38

Максимальная стоимость проекта в данном случае связана с затратами на разработку установки, к тому же, месторасположение требует согласования с заводом изготовителем. Таким образом, текущий проект является самым дорогим.

Интегральный показатель эффективности разработки проекта определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности проекта и интегрального финансового показателя, по формуле (для текущего проекта):

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_{\text{т}}^p}{I_{\text{ф}}^p} = \frac{4,75}{1} = 4,75.$$

Далее определим сравнительную эффективность проекта, по формуле (для текущего проекта):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a} = \frac{4,75}{3,8} = 1,25.$$

Сведем расчеты всех показателей в таблицу 19.

Таблица 19 – Сравнительная эффективность разработки

Показатель	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,5	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности проекта	4,75	1,9	4,15
Интегральный показатель эффективности разработки проекта	4,75	3,8	4,15
Сравнительная эффективность проекта	1,25	0,92	1,09

Сравнительные анализ, приведённый выше, демонстрирует, что текущий проект является наиболее ресурсоэффективным вариантом разработки.

**Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

Исследование установок для сжигания отходов, не имеет как такового коммерческого потенциала и конкурентов, т.к. топливо по факту вторичное сырье, требующие утилизации.

В SWOT-ходе анализа было установлено, что сильные стороны технического проекта (сокращение издержек при ремонте, дефектации оборудования, инновационность) преобладают над слабыми аспектами, а угрозы имеют предсказуемый характер.

3. При планировании научного исследования была описана структура проекта, определен объем работ и составлен их план-график, в который входит 10 пунктов. Деление целого исследования на отдельные задачи с указанными сроками помогает ориентироваться в рабочем процессе, что делает его эффективным

4. Для наглядной иллюстрации плана работы была составлена диаграмма Ганта. В ней отражены этапы планирования и моделирования варианта работы. По данной диаграмме самым продолжительным видом работ является – выполнение серии экспериментов (126 дней из 458 дней). При этом основная часть работ выполняется инженером.

5. Большая часть бюджета идёт на разработку установки, что говорит о необходимости строго придерживаться заданного регламента работ.

6. Обзор финансовой деятельности компании продемонстрировал её способность к инвестированию в непродолжительные проекты (таким является рассматриваемое исследование). Анализ ресурсоэффективности проекта, проведенный по интегральному показателю, дал высокий результат (4,75 по 5-балльной шкале), что говорит о более успешной реализации технического проекта по сравнению с аналогами.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
5БМ11		Губин Артур Владимирович	
Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение (НОЦ)	И.Н. Бутакова
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Тема ВКР:

<i>Совместное сжигание углеродного остатка пиролиза отработанных шин с биомассой</i>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p><b>Введение</b></p> <p>Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</p> <p>– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации</p>	<p><b>Объект исследования:</b> сжигание резинотехнических изделий.</p> <p><b>Область применения:</b> утилизации отработавших резинотехнических изделий, для энергетических нужд.</p> <p><b>Рабочая зона:</b> лаборатория газификации твердых топлив</p> <p><b>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</b> дробилка, дезинтегратор, вибросито, миксер, высокоскоростная видеокамера, компьютер, электроцит, емкости для хранения компонентов</p> <p><b>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</b> помол и просев углеродного остатка и биомассы, приготовление смесового топлива,, замер показателей, изучение состава топлива и анализ характеристик</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения</b></p> <p>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</p>	<p>– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. От 29.12.2020)</p> <p>– СанПиН 1.2.3685-21</p> <p>– ГОСТ 12.2.032-78</p> <p>– Федеральный закон “О специальной оценке условий труда” от 28.12.2013 г. №426</p>



– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	
<b>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</b>	Вредные факторы: отклонение показателей микроклимата, отсутствие естественного освещения, недостаточная освещенность, высокий уровень шума; – Опасные факторы: действие электрического тока, высокая температура оборудования.
<b>3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения</b>	Атмосфера: выбросы парниковых газов; Гидросфера: тепловое загрязнение, забор и сброс вод; Литосфера: выброс шлама и золы.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения</b>	Возможные ЧС: пожар, хим. авария, взрыв, обрушения зданий. Наиболее типичная ЧС: пожар
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент (ООД, ШБИП)	Сечин Андрей Александрович	Кандидат технических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ11	Губин Артур Владимирович		

## **5 Социальная ответственность**

Целью данной ВКР является проведение экспериментов на установке для изучения процессов пиролиза и сжигания резин. Данная экспериментальная установка позволяет наблюдать за процессом пиролиза резины, получать необходимые данные, исследовать особенности пиролиза и окисления. Установка представляет собой печь, баллоны с инертными газами, парогенератор, конденсатор и нагревательный элемент. Конструкцией установки предусмотрена для пиролиза, сжигания и процессов окисления. Также в состав оборудования входят: газоанализатор, термопара. Экспериментальная установка находится в лаборатории 8 корпуса ТПУ.

### **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Главная задача по обеспечению безопасных условий трудовой деятельности ложится на администрацию и инженерные кадры предприятий, в обязанности которых входят: выявление, предупреждение, ограничение и устранение опасных и вредных факторов производства; решение вопросов гуманизации оборудования, технологии производства и организация труда; нормализация санитарно-гигиенических норм; улучшение эргономики рабочего места сотрудника и помещений и их санитарно-бытовое обслуживание.

В данной ВКР основным атрибутом рабочего места человека, который проводит эксперимент, является экспериментальный стенд, которые состоит из печи, высокоскоростной камеры, газоанализатора, баллонов с газом и вытяжного шкафа. Основная часть работы проходит в положении стоя.

Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства. Из трудового кодекса РФ [86] следует, что продолжительность рабочей недели не должна превышать 40 часов при пятидневной неделе, и 48 часов при шестидневной.

Все работники лаборатории обязаны пройти инструктаж по технике безопасности: знать меры при возникновении ЧС, расположение первичных средств пожаротушения, план эвакуации и нахождение кнопок оповещения.

Существуют методические рекомендации, которые необходимо соблюдать работнику лаборатории [87]:

- К работе не допускаются лица, не прошедшие инструктаж (периодичность – 2 раза в год);
- Работа с химическими веществами запрещена беременным женщинам и несовершеннолетним;
- Периодичность медосмотров – 1 раз в год;
- Все работающие в лаборатории должны быть обеспечены необходимой спецодеждой и средствами индивидуальной защиты.

Эффективное выполнение задачи требует соответствующую организацию рабочего места. По данным [88] она включает три основных направления: оснащение, обслуживание и планировка рабочего места.

К оснащению рабочего места относится его укомплектование основным технологическим и вспомогательным оборудованием, технологической и организационной оснасткой в количестве, которое необходимо и достаточно для эффективного и качественного решения поставленной задачи.

К обслуживанию рабочего места относится его регламентированное обеспечение рабочим инструментом и предметом труда, всеми необходимыми видами услуг, в том числе и электрической энергией, в количестве, которое необходимо и достаточно для поддержания непрерывной и заданной интенсивности процесса труда.

К планировке рабочего места относится такое размещение оборудования, элементов оснастки, предметов труда, при котором достигается их оптимальное расположение и досягаемость при выполнении работ.

Удобство рабочей позы, предотвращение лишних движений, исключение ненужных перемещений, снижение утомляемости, а, следовательно, сокращение потерь рабочего времени достигается за счет рациональной планировки и эргономичности рабочего места.

Организация рабочих мест в лабораторных помещениях требует выполнения следующих условий:

- Обеспечение свободного и достаточного для необходимых движений и перемещений пространства;
- Эффективность естественного и искусственного освещения;
- Сохранение нормированного микроклимата;
- Соблюдение норм акустического шума.

Каждый работник имеет право на [86]:

- Рабочее место, которое соответствует всем необходимым требованиям охраны труда;
- Обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- Отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- Обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- Профессиональную переподготовку за счет средств работодателя в случае ликвидации рабочего места вследствие нарушения требований охраны труда;
- Внеочередной медицинский осмотр (обследование) в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного

медицинского осмотра (обследования);

- Компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на тяжелых работах, работах с вредными и (или) опасными условиями труда;

- На работах с особо вредными условиями труда предоставляется бесплатно по установленным нормам лечебно-профилактическое питание.

## **5.2 Производственная безопасность**

Экспериментальная установка ввиду своей конструкции и специфики использования является объектом, вызывающим вредное или опасное воздействие на человека.

Вредными считаются факторы, оказывающие негативное влияние на самочувствие и работоспособность человека, вызывающие заболевания. Опасными считаются факторы, вызывающие травмы. Факторы по своей природе делятся на четыре группы: физические, химические, биологические и психофизиологические.

Между вредными и опасными производственными факторами наблюдается определенная взаимосвязь. Во многих случаях наличие вредных факторов способствует проявлению опасных факторов — например, чрезмерная влажность в производственном помещении и наличие токопроводящей пыли (вредные факторы) повышают опасность поражения человека электрическим током (опасный фактор).

Таблица 20 – Возможные опасные и вредные факторы.

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
1. Отклонение показателей микроклимата	+	СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [];
2. Превышение уровня шума	+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности» [];
3. Недостаточная освещённость рабочей зоны	+	СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» [];
4. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	ГОСТ 12.1.038-82. «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов» [].
5. Утечка вредных веществ.		ГОСТ 12.1.007-76 «Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
6. Тепловой удар		СП 61.13330.2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов».

Далее представлен анализ рабочего места инженера-лаборанта на предмет возникновения вредных и опасных производственных факторов.

### **5.3 Анализ выявленных вредных факторов**

#### **5.3.1 Отклонение показателей микроклимата**

Микроклиматом называется совокупное воздействие на человека таких факторов, как температура и влажность воздуха, его скорость движения, барометрическое давление и т.д.

Микроклимат оказывает влияние на самочувствие человека, терморегуляцию его организма, утомляемость и внимательность. Таким образом длительное воздействие неблагоприятных микроклиматических условий приводит к снижению работоспособности и может вызвать различные заболевания человека. Нормы производственного микроклимата регламентируются в [88].

Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны представлены в таблице 21.

Таблица 21 – Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia	22...24	16...24	40-60	0,1
Теплый	Ia	23...25	14...27	40-60	0,1

Для обеспечения комфортных условий используются: как и организационные методы (рациональная организация проведения работ в зависимости от времени года и суток, чередование труда и отдыха), так и технические средства (вентиляция, кондиционирование воздуха, отопительная система).

К индивидуальным средствам защиты от отклонений микроклимата может относиться одежда, обеспечивающая комфорт при определённых климатических условиях.

### 5.3.2 Повышенный уровень шума

Шум – беспорядочные колебания различной физической природы, один из наиболее распространенных неблагоприятных физических факторов окружающей среды, приобретающих важное социально-гигиеническое значение, в связи с урбанизацией, а также механизацией и автоматизацией технологических процессов. Длительное воздействие шума может привести к тугоухости или даже к глухоте. Также шум оказывает воздействие на нервную систему, вызывая учащение пульса и дыхания, увеличение расхода энергии, что приводит к более раннему переутомлению и истощению. Невнимательность, подавленное состояние, заторможенность интеллектуальных процессов являются результатом воздействия шума на психику человека. Все это в совокупности влечет за собой снижение производительности труда и работоспособности.

Источниками шума в данной работе будут газовые баллоны с компрессором (нагнетающие газ), парогенератор, насосы, подключаемые к установке.

По данным [89] максимально допустимый уровень шума в лабораторных помещениях 75 дБА.

Таблица 22– Допустимый уровень шума в лабораторных помещениях.

	Уровни звукового давления, дБА, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровень звука, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Лабораторное помещение	103	91	83	77	73	70	68	66	64	75

### 5.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Важно правильно организовать освещение на рабочем месте, так как это влияет на работоспособность и эффективность труда, снижает травматизм и утомление, повышает безопасность рабочего места. Слабое освещение приводит к преждевременному утомлению, ослаблению внимания и перенапряжению зрительных органов. Повышенный уровень освещения ведет к рези в глазах и слепоте. Дезориентацию вызывает неправильное направление света на рабочем месте.

Нормы освещенности рабочего места и основные требования даны в [90]. Для поддержания необходимого уровня освещенности требуется грамотный выбор типа ламп и светильников, а также их правильное расположение.

Расчет освещения для лаборатории, в которой проводились эксперименты, на экспериментальной установке по пиролизу и сжиганию резины.

Расположение светильников в помещении определяется следующими размерами:



$H = 3$  м – высота помещения;

$h_p = 0,75$  м – высота рабочей поверхности над полом;

$h = h_{\text{п}} - h_p = 2,8 - 0,75 = 2,05$  м – высота светильника над рабочей поверхностью.

$h_c = 0,2$  м – расстояние светильников от перекрытия (свес);

$h_{\text{п}} = H - h_c = 3 - 0,2 = 2,8$  м – высота светильника над полом, высота подвеса;

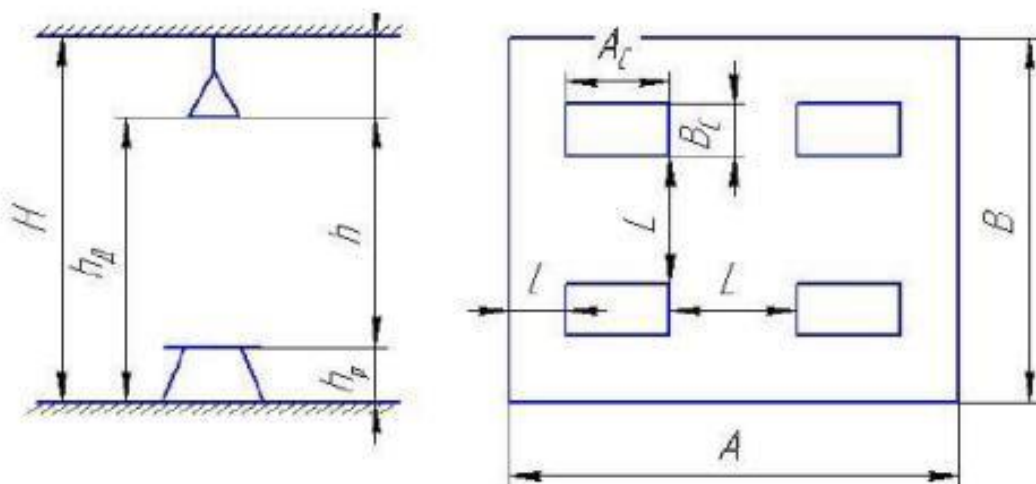


Рисунок 20 – Основные параметры для расчета освещения

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda$ . Для светильников люминесцентными лампами без защитной решетки типов ОД, ОДО  $\lambda = 1,4$ .

Расстояние между светильниками  $L$  определяется как:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,05 = 2,87 \text{ м};$$

Тогда расстояния от крайнего ряда до стены будет равно:

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2,87}{3} = 0,957 \text{ м}.$$

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока. Это коэффициент, который учитывает световой поток, отражённый от потолка и стен. Световой поток группы люминесцентных ламп определяется по формуле:

$$\Phi = E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z \cdot \frac{100}{n \cdot \eta}, \text{ лм,}$$

где:

- $E_n$  – нормируемая минимальная освещённость,  $E_n = 300$  лк;
- $S$  – площадь освещаемого помещения,  $S = A \cdot B = 12,5 \cdot 6 = 75 \text{ м}^2$ ;
- $K_3$  – коэффициент запаса, учитывающий старение ламп и загрязнение светильников, при малом выделении пыли  $K_3 = 1,5$ ;
- $Z$  – коэффициент неравномерности освещения. Для люминесцентных ламп при расчётах составляет  $Z = 1,1$ ;
- $n$  – число ламп в помещении, примем  $N=12$ ;
- $\eta$  – коэффициент использования светового потока, %.

Для лаборатории:  $p_c = 30\%$  – стены оклеены светлыми обоями;  $p_p = 50\%$  – потолок чистый бетонный.

Коэффициент использования светового потока светильника  $\eta = 55\%$ .

Световой поток лампы в каждом из рядов:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K \cdot z}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 75 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,55} = 5625 \text{ люмен.}$$

Выбираем светильник ОД – 2 – 80 с лампой ЛБ 80:

Световой поток лампы – 5200 лм;

Количество – 2;

Мощность – 80 Вт;

Габариты светильника:

- Длина – 1531 мм;

- Ширина – 266 мм;

- Высота – 198 мм.

Далее проверяем выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{станд}} - \Phi_{\text{расч}}}{\Phi_{\text{расч}}} \cdot 100\% \leq 20\%$$

$$\frac{5200 - 5625}{5625} \cdot 100 = -7,5\%$$

$-10\% \leq -7,5 \leq 20\%$  – условия \_ в выполняются.

Определяем электрическую мощность осветительной установки:

$$P = P_0 \cdot N = 80 \cdot 12 = 960 \text{Вт.}$$

Изобразим план размещения светильников на рисунке 5.2.

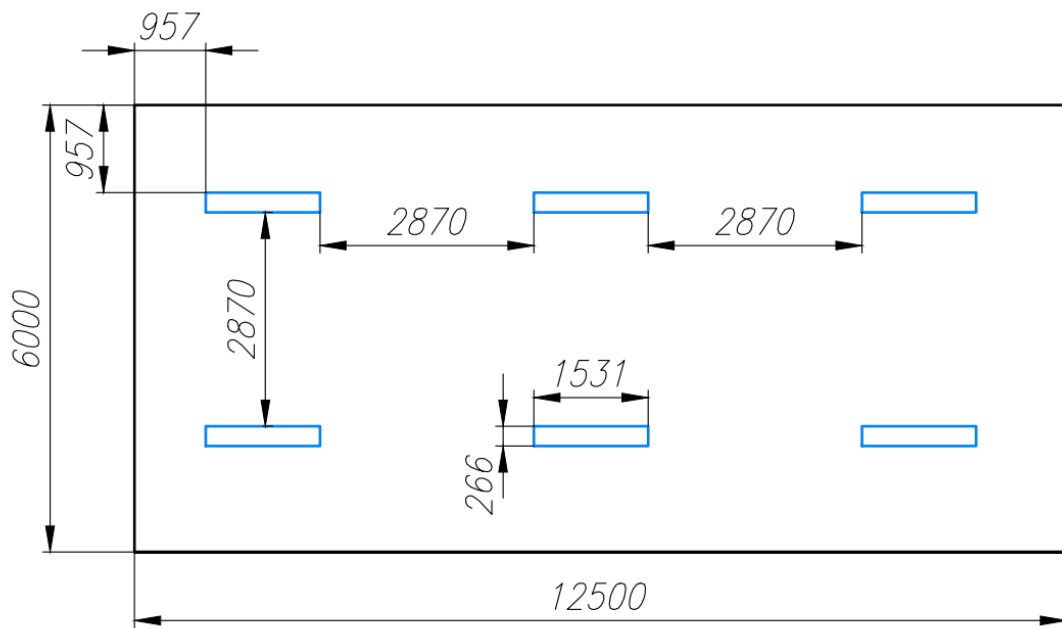


Рисунок 21 – Размещения светильников с люминесцентными лампами.

5.3.4 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

При использовании электрических приборов возникает вероятность получения травм от воздействия электрического тока на организм человека. Поэтому мероприятия по обеспечению электробезопасности имеют большое значение.

Несчастные случаи при воздействии электрического тока случаются по следующим причинам:

1. Возникающие шаговые напряжения на поверхности земли в результате замыкания электрического провода на землю;

2. Появление напряжения в результате случайного или ошибочного включения электроустановки во время проводимых технических работ на ее токопроводящих частях.

Помещение лаборатории относится к особо опасным помещениям, так как характеризуется наличием одновременно двух или более условий повышенной опасности [91]. Условия, создающие условия особой опасности в лабораторном помещении:

Наличие токопроводящей пыли в виде ультрадисперсной углеродной пыли (сажи);

Одновременное прикосновение человека к корпусам электрического оборудования или их токопроводящим частям и к каким-либо токопроводящим конструкциям, имеющим заземление.

Для обеспечения безопасности работы на электрических установках проводятся следующие организационные мероприятия, прописанные в [92]:

К работе на электрических установках допускается привлекать лиц не моложе 18 лет, которые прошли инструктаж и обучение безопасным методам труда и не имеют медицинских противопоказаний;

Обязательное назначение лиц, которые несут ответственность за организацию и проведение работ;

Создание организации по надзору за проведением работ.

- К техническим способам обеспечения электробезопасности относят:
- Использование изоляции токопроводящих частей установок;
- Наличие защитного заземление;
- Предусмотренное защитное отключение питания электроустановок.

### 5.3.5 Тепловая изоляция

Непосредственным источником термической опасности является электродуговой разряд. Также вследствие высокой температуры нагреваются и остальные технические элементы экспериментальной установки, поэтому возникает потребность в использовании тепловой изоляции.

Тепловая изоляция – материал или конструкция, которая уменьшает коэффициент теплопередачи от горячей поверхности к более холодной, тем самым увеличивая термическое сопротивление конструкции в целом.

Классификация тепловой изоляции:

- Строительная – изолирует ограждающие конструкции (крыши, полы, стены);
- Техническая – изолирует оборудование и трубопроводы;
- Специальная – изолирует вакуумные установки.

Согласно [93] во избежание возникновения тепловых травм температура наружных поверхностей находящегося в помещении теплообменного оборудования, температура теплоносителя которого не превышает 150°C, не должна превышать 40°C.

Температуры наружных поверхностей установки, используемой в данной ВКР, не превышают 120°C. Поэтому принято решение использовать в качестве тепловой изоляции керамическую сверхтонкую теплоизоляцию «КОРУНД».

## **5.4 Экологическая безопасность**

Экологическая безопасность - приемлемый уровень деструктивного влияния природных и антропогенных факторов экологических опасностей, которые представляют угрозу для окружающей среды.

Установка в данной ВКР не имеет производственных масштабов, ее производство и эксплуатация не оказывает заметного влияния на окружающую среду, но установки для сжигания и пиролиза в энергетических нуждах влияют.

### **5.4.1. Защита атмосферы**

В процессе пиролиза и горения образуются горючие газы  $H_2$  и  $CO$  смешиваются с природным газом, далее после сжигания образуются продукты горения, представляющие смесь воздуха и дымовых газов. Дымовые газы, в

состав которых входят: оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), зола и др. – подвергаются очистке, так как загрязняют атмосферу.

Очистка дымовых газов осуществляется с помощью циклонов. С помощью центробежной силы поток воздуха раскручивается, после чего тяжелые частицы (пыль) выносятся на края устройства и оседают в пылесборнике.

#### 5.4.2. Защита гидросферы

В результате производственной и хозяйственно-бытовой деятельности электростанций образуются: промывочные и консервационные воды, регенерационные воды водоподготовительных установок (ВПУ) и др.

Сточные воды по своему составу разнообразны. Для очистки вод применяются следующие методы: механические, химические, физико-химические и биологические.

Качественные и количественные показатели состояния поверхностных (степень загрязненности) и сточных вод следует контролировать с помощью надежной системы наблюдений, контроля и оценки [93].

#### 5.4.3. Защита литосферы

Отходы производства станции в литосферу – обтирочный материал; мусор от уборки помещений; шлак от печи; хим. вещества от золы, которая осаждается после выброса в атмосферу.

Для сбора и вывоза отходов предусмотрены контейнеры и ёмкости на специально отведённых для них площадках. Шлак отправляется шлакоотвалы. Земли золошлакоотвалов подвергаются рекультивации.

### 5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Комплекс государственных стандартов безопасности в ЧС – совокупность стандартов, связанных между собой и устанавливающих требования, нормы и правила, способы и методы, направленные на

обеспечение безопасного функционирования населения и объектов народного хозяйства и окружающей природной среды в ЧС [93].

Задача обеспечения безопасности людей в ЧС, вызываемых природными стихийными бедствиями, техногенными катастрофами и применением оружия (ЧС военного характера) является общегосударственной, которая обязательна для разрешения всеми органами управления и регулирования, службами и различными формированиями, а также подсистемами, входящими в Российскую систему предупреждения и действий в чрезвычайных ситуациях.

В процессе эксплуатации установки возможно возникновение следующих ЧС: Пожары; Землетрясения; Обрушения зданий.

Для повышения устойчивости работы экспериментальной установки в ЧС предусмотрена установка источника бесперебойного питания, которое обеспечивает безопасную остановку работы установки в условиях нарушения электро- и водоснабжения. Также предусматривается формирование запасов медицинских и прочих санитарных средств.

Далее наиболее типичная ЧС: пожар.

#### 5.5.1 Пожарная опасность

Основной целью пожарной безопасности является поиск и модернизация обладающих наибольшей эффективностью с экономической и технической точки зрения способов и средств предупреждения возникновения очагов возгорания, а также их ликвидация с наименьшим ущербом и наиболее рациональным использованием сил и технических средств тушения пожаров.

Также причинами пожара могут стать замыкания проводов, перегруженные сети и т.д., а также возгорающиеся предметы (изоляция проводов) [94].

Лабораторные помещения по пожарной опасности относятся к категории В [95], т.к. для них характерно наличие горючих и трудно-горючих жидкостей, твердых горючих и трудно-горючих веществ и материалов (в том

числе пыли и волокон), веществ и материалов, которые при взаимодействии с водой, кислородом или друг с другом могут воспламеняться, при условии, что помещения, в которых они имеются в наличии или обращаются, не относятся к категориям А или Б.

Мероприятия по предотвращению возникновения очагов возгорания:

- Организационные;
- Технические;
- Строительно-планировочные.

Целью строительно-планировочных мероприятий является повышение огнестойкости и предела огнестойкости зданий: замена сгораемых материалов на несгораемые или трудно сгораемые.

Целью технических мероприятий является соблюдение противопожарных норм систем вентиляции, отопления, освещения, электрического обеспечения при эвакуации, а также наличие противопожарных защитных систем и соблюдение проектных режимов работы оборудования.

Целью организационных мер является обучение персонала соблюдению мер пожарной безопасности.

Одним из средств пожаротушения являются огнетушители. Выбор их типа и количества зависит от огнетушащей способности, класса возгорания горючих веществ, материалов и предельной площади. Исходя из [96], принято решение установить два углекислотных огнетушителя марки ОУ-5, т.к. напряжение электроустановок не превышает 1000 В.

В помещениях автоматически срабатывают датчики пожаротушения, и звуковая система оповещает всех работников о немедленной эвакуации, далее все направляются на выход в соответствии с планом эвакуации при пожарах и других ЧС.



### **Выводы по разделу**

В данном разделе были рассмотрены вопросы выполнения требований к безопасности и гигиене труда, к промышленной безопасности, охране окружающей среды и ресурсосбережению. В соответствии со стандартом были приняты решения, исключая несчастные случаи в производстве и направленные на снижение вредных воздействий на окружающую среду. Для более эффективного процесса утилизации изношенной резины было принято решение, рассчитать установку по пиролизу и сжиганию отходов шин. По итогам можно сказать, что данный способ имеет большой потенциал в сфере утилизации отходов из резинотехнических изделий.

## Заключение

Определены характеристики выбросов сложных продуктов сгорания и газовой фазы отработанных шин, пиролизного углеродного остатка с добавками торфа и сосновых опилок с концентрациями до 15 мас.%. Данные термического анализа показали, что окислительные характеристики смесей сходны с профилями окисления отдельных ее компонентов, что указывает на слабые взаимодействия между компонентами при низких скоростях нагрева. Это тесно связано с низкой скоростью реакции в условиях термического анализатора и низким диффузионным сопротивлением доступа кислорода к поверхности образца. Однако при окислении в диапазоне от 250 до 400 °С образуется дополнительная низкотемпературная стадия, которая характерна для гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина – типичных компонентов биомассы разных типов.

Характеристики горения, напротив, выявили сильные синергетические эффекты между углеродным остатком пиролиза отработанных шин и добавками биомассы, выраженные в более низких значениях времени задержки воспламенения при температуре теплоносителя 800 °С: до 78 % при 15 мас.% добавки сосновых опилок и 44 % при 15 мас.% торфяной добавки. Возможными причинами этого могут быть особенности адсорбции кислорода на поверхности образца на стадиях выделения летучих веществ и сжигания углерода, а также дополнительного тепла, выделяемого при выделении и окислении летучих веществ из добавок биомассы (торфа и опилок).

В то время как для торфа увеличение концентрации добавки не приводило к уменьшению времени задержки воспламенения – разница между 5 и 15 мас.% добавки составляла менее 5 %, для сосновых опилок наблюдалось обратное – более высокая концентрация соответствовала меньшему времени задержки воспламенения (время задержки воспламенения снизилось на 60 % с 2,2 до 0,9 с с увеличением добавки опилок с 5 до 15 мас.%). Это вызвано более высоким содержанием летучих веществ и теплотворной способностью опилок

по сравнению с торфом. Механизм такого поведения был предложен на основе анализа изображений высокоскоростной записи видеокамер.

Профили концентраций продуктов сгорания в газовой фазе показали как более высокую пиковую концентрацию, так и валовые выбросы оксидов азота, в то время как для оксида серы наблюдалось обратное. Такое поведение было связано с более высокой реакционной способностью и скоростью сгорания топливных композитов и изменением вклада различных факторов, таких как содержание азота в летучих веществах и угле, а также связывание серы с твердыми компонентами зольного остатка.

Учитывая различные аспекты применения добавки к биомассе, 5 мас.% торфа и 10 мас.% сосновых опилок рекомендовано применять в качестве добавки для сжигания отработанных шин, пиролиза, углеродных остатков.

## Conclusion

The emission characteristics of complex combustion products and gas phase of waste tires, pyrolysis carbon residue with peat and pine sawdust additives with concentrations up to 15 wt % were determined. Thermal analysis data showed that the oxidation characteristics of the mixtures were similar to the oxidation profiles of its individual components, indicating weak interactions between the components at low heating rates. This is closely related to the low reaction rate under thermal analyzer conditions and the low diffusion resistance of oxygen access to the sample surface. However, oxidation between 250 and 400 °C produces an additional low-temperature stage, which is characteristic of hemicellulose, cellulose, and lignin, the typical components of different types of biomass.

In contrast, the combustion characteristics revealed strong synergistic effects between waste tire pyrolysis carbon residue and biomass additives, expressed in lower ignition delay times at a coolant temperature of 800 °C: up to 78 % at 15 wt.% pine sawdust additive and 44 % at 15 wt.% peat additive. Possible reasons for this may be the peculiarities of oxygen adsorption on the surface of the sample at the stages of volatile matter extraction and carbon combustion, as well as the additional heat released during the extraction and oxidation of volatiles from biomass additives (peat and sawdust).

While for peat, increasing the additive concentration did not lead to a decrease in ignition delay time - the difference between 5 and 15 wt% additive was less than 5%, the opposite was observed for pine sawdust - a higher concentration corresponded to a lower ignition delay time (ignition delay time decreased by 60% from 2.2 to 0.9 s with an increase in sawdust additive from 5 to 15 wt%). This was caused by the higher volatile matter content and calorific value of sawdust compared to peat. The mechanism for this behavior was proposed based on the analysis of high-speed camera recording images.

The concentration profiles of combustion products in the gas phase showed both higher peak concentration and gross emissions of nitrogen oxides, while the

opposite was observed for sulfur oxide. This behavior was related to the higher reactivity and combustion rate of the fuel composites and the changing contribution of various factors, such as the nitrogen content of volatiles and coal, as well as sulfur binding to the solid components of the ash residue.

Considering the different aspects of biomass additive application, 5 wt.% peat and 10 wt.% pine sawdust are recommended as additive for combustion of waste tires, pyrolysis, carbon residues.

## Список публикаций студента

1. Ignition of pelletized mixed fuels based on 3B grade coal and wood waste. Yankovsky, S.A., Tolokolnikov, A.A., Gubin, A.V. AIP Conference Proceedings, 2019, 2135, 020062

2. ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛУКОКСА ИЗ КОФЕЙНОГО ЖМЫХА В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ ДЛЯ СИНТЕЗА КАРБИДА КРЕМНИЯ. ГУБИН А.В. ЛАРИОНОВ К.Б., ГЕРАСИМОВ Р.Д., ПАК А.Я., Журнал ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ с.75-81.

3. Модификатор горения твердого топлива на основе предшественников оксидов металлов. Губин А.В., Ларионов К.Б.

4. Интеграция цикла Аллама в схему ТЭС. Губин В.Е., Губин А.В. Естественные и технические науки. – 2023. – № 3(178).

5. Исследование процесса совместного сжигания низкорекреационного ископаемого топлива с древесным углем. А.Ж. Калтаев, Горшков, А.К. Асылбеков, К.Б. Ларионов, Губин А.В.

6. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ БУРОГО УГЛЯ И АНТРАЦИТА НИТРАТАМИ МЕТАЛЛОВ. Губин А.В., Калтаев А.Ж., Горшков А.С., Матвеева А.А., Ларионов К.Б. КОКС И ХИМИЯ № 5 2023.

7. Ignition and emission characteristics of waste tires pyrolysis char co-combustion with peat and sawdust. Slyusarsky K.V., Tolokilnikov A.A, Gubin A.A., Kaltaev A, Gorshkov A.S., Asilbekov, Larionov K.B. Energies 2023, 16(10). <https://doi.org/10.3390/en16104038>.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Pan Y. et al. Effect of Adding Pyrolysis Carbon Black (CBp) on Soft Friction and Metal Wear during Mixing // *Polymers (Basel)*. MDPI, 2022. Vol. 14, № 7. P. 21.
2. Abdulrahman A.S., Jabrail F.H. Treatment of Scrap Tire for Rubber and Carbon Black Recovery // *Recycling*. MDPI, 2022. Vol. 7, № 3. P. 13.
3. Statista. Heavy and light vehicle tire sales in Europe from 2012 to 2020 [Electronic resource]. URL: <https://www.statista.com/statistics/411281/european-heavy-and-light-vehicle-tire-sales/>.
4. Statista. Global demand for car and light commercial vehicle tires from 2012 to 2018 [Electronic resource]. URL: <https://www.statista.com/statistics/792209/global-tire-demand/>.
5. Techart. Маркетинговое исследование рынка переработки использованных шин [Electronic resource]. URL: <https://research.techart.ru/report/used-tyres.htm>.
6. Д.В. В., О.Р. А. ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕРАБОТКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПОКРЫШЕК. 2011. Vol. 1, № 1. P. 351.
7. Oudia A. et al. Analytical pyrolysis study of biodelignification of cloned *Eucalyptus globulus* (EG) clone and *Pinus pinaster* Aiton kraft pulp and residual lignins // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2009. Vol. 85, № 1–2. P. 19–29.
8. ETRA. The european tyre recycling association [Electronic resource]. URL: <https://www.etra-eu.org>.
9. Пихль О.А. et al. Переработка автомобильных шин методами пиролиза и гидрогенизации // *Химия твердого топлива*. Akademizdatcenter Nauka, 2013. Vol. 2013, № 3. P. 51–60.
10. Hrynyshyn K., Skorokhoda V., Chervinskyu T. STUDY ON THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF PYROLYSIS PYROCONDENSATE OF USED TIRES // *Chem. Chem. Technol. Lviv Polytechnic National University*, 2022. Vol. 16, № 1. P. 159–163.

11. МоторШеф. «Сибур» проанализировал проблему утилизации шин в России [Electronic resource]. URL: <https://motorshef.ru/news/10449>.
12. Li S.Q. et al. Properties of pyrolytic chars and activated carbons derived from pilot-scale pyrolysis of used tires // *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2005. Vol. 55, № 9. P. 1315–1326.
13. Labaki M., Jeguirim M. Thermochemical conversion of waste tyres—a review // *Environ. Sci. Pollut. Res. Environmental Science and Pollution Research*, 2017. Vol. 24, № 11. P. 9962–9992.
14. АвиАПОРТ. ЧТО ВНУТРИ АВИАЦИОННОЙ ШИНЫ? [Electronic resource]. URL: <https://www.aviaport.ru/digest/2019/12/06/617941.html>.
15. Ferdous W. et al. Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction – A review on global waste generation, performance, application and future opportunities // *Resour. Conserv. Recycl. Elsevier B.V.*, 2021. Vol. 173, № June. P. 105745.
16. Sharma V.K. et al. Disposal of waste tyres for energy recovery and safe environment // *Appl. Energy*. 2000. Vol. 65, № 1–4. P. 381–394.
17. Roy C. et al. Characterization of naphtha and carbon black obtained by vacuum pyrolysis of polyisoprene rubber // *Fuel Process. Technol.* 1997. Vol. 50, № 1. P. 87–103.
18. Roy C., Chaala A., Darmstadt H. Vacuum pyrolysis of used tires end-uses for oil and carbon black products // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 1999. Vol. 51, № 1. P. 201–221.
19. Benallal B. et al. Characterization of pyrolytic light naphtha from vacuum pyrolysis of used tyres // *Fuel*. 1995. Vol. 74, № 11. P. 1589–1594.
20. Lopez G. et al. Vacuum pyrolysis of waste tires by continuously feeding into a conical spouted bed reactor // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010. Vol. 49, № 19. P. 8990–8997.
21. Williams P.T., Brindle A.J. Catalytic pyrolysis of tyres: Influence of catalyst temperature // *Fuel*. 2002. Vol. 81, № 18. P. 2425–2434.



22. Olazar M. et al. Catalyst effect on the composition of tire pyrolysis products // *Energy and Fuels*. 2008. Vol. 22, № 5. P. 2909–2916.
23. Amutio M. et al. Valorisation of waste tires by pyrolysis over a FCC catalyst in a conical spouted bed reactor // *Chem. Eng. Trans.* 2012. Vol. 29. P. 817–822.
24. Zhang X. et al. Vacuum pyrolysis of waste tires with basic additives // *Waste Manag.* 2008. Vol. 28, № 11. P. 2301–2310.
25. Bridgwater A. V. The production of biofuels and renewable chemicals by fast pyrolysis of biomass // *Int. J. Glob. Energy Issues*. 2007. Vol. 27, № 2. P. 160–203.
26. Hita I. et al. Opportunities and barriers for producing high quality fuels from the pyrolysis of scrap tires // *Renew. Sustain. Energy Rev. Elsevier*, 2016. Vol. 56. P. 745–759.
27. Butler E. et al. A review of recent laboratory research and commercial developments in fast pyrolysis and upgrading // *Renew. Sustain. Energy Rev. Elsevier Ltd*, 2011. Vol. 15, № 8. P. 4171–4186.
28. Rijo B., Soares Dias A.P., Wojnicki Ł. Catalyzed pyrolysis of scrap tires rubber // *J. Environ. Chem. Eng.* 2022. Vol. 10, № 1.
29. Li J. et al. Surface activation of scrap tire crumb rubber to improve compatibility of rubberized asphalt // *Resour. Conserv. Recycl. Elsevier B.V.*, 2021. Vol. 169, № February. P. 105518.
30. Srinivasan S. et al. Experimental investigation on the influence of novel catalyst in co-pyrolysis of polymeric waste: Characterization of oil and preparation of char reinforced composites // *J. Clean. Prod. Elsevier Ltd*, 2021. Vol. 316, № July. P. 128225.
31. Mohan A. et al. Liquid fuel from waste tires: novel refining, advanced characterization and utilization in engines with ethyl levulinate as an additive // *RSC Adv. Royal Society of Chemistry*, 2021. Vol. 11, № 17. P. 9807–9826.

32. Kumar Singh R. et al. Pyrolysis of three different categories of automotive tyre wastes: Product yield analysis and characterization // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. Elsevier B.V., 2018. Vol. 135. P. 379–389.
33. Yazdani E., Hashemabadi S.H., Taghizadeh A. Study of waste tire pyrolysis in a rotary kiln reactor in a wide range of pyrolysis temperature // *Waste Manag.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 85. P. 195–201.
34. Doja S., Pillari L.K., Bichler L. Processing and activation of tire-derived char: A review // *Renew. Sustain. Energy Rev.* Pergamon, 2022. Vol. 155. P. 111860.
35. Williams P.T. Pyrolysis of waste tyres: A review // *Waste Manag.* Elsevier Ltd, 2013. Vol. 33, № 8. P. 1714–1728.
36. Martínez J.D. et al. Waste tyre pyrolysis – A review // *Renew. Sustain. Energy Rev.* Pergamon, 2013. Vol. 23. P. 179–213.
37. Pakdel H., Pantea D.M., Roy C. Production of dl-limonene by vacuum pyrolysis of used tires // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2001. Vol. 57, № 1. P. 91–107.
38. Betancur M., Martínez J.D., Murillo R. Production of activated carbon by waste tire thermochemical degradation with CO<sub>2</sub> // *J. Hazard. Mater.* 2009. Vol. 168, № 2–3. P. 882–887.
39. Zabaniotou A.A., Stavropoulos G. Pyrolysis of used automobile tires and residual char utilization // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2003. Vol. 70, № 2. P. 711–722.
40. Roy C. et al. Conversion of used tires to carbon black and oil by pyrolysis // *Rubber Recycl.* 2005. P. 429–468.
41. Pantea D. et al. Heat-treatment of carbon blacks obtained by pyrolysis of used tires. Effect on the surface chemistry, porosity and electrical conductivity // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2003. Vol. 67, № 1. P. 55–76.
42. Teng H., Lin Y.C., Hsu L.Y. Production of activated carbons from pyrolysis of waste tires impregnated with potassium hydroxide // *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2000. Vol. 50, № 11. P. 1940–1946.

43. Wang F., Gao N., Quan C. Effect of hot char and steam on products in waste tire pressurized pyrolysis process // *Energy Convers. Manag.* Elsevier Ltd, 2021. Vol. 237, № March. P. 114105.
44. Gao N. et al. Tire pyrolysis char: Processes, properties, upgrading and applications // *Prog. Energy Combust. Sci.* Pergamon, 2022. Vol. 93. P. 101022.
45. Ma S. et al. Effects of pressure and residence time on limonene production in waste tires pyrolysis process // *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* Elsevier B.V., 2020. Vol. 151, № August. P. 104899.
46. Li Q. et al. Thermolysis of scrap tire and rubber in sub/super-critical water // *Waste Manag.* Elsevier Ltd, 2018. Vol. 71. P. 311–319.
47. Kar Y. Catalytic pyrolysis of car tire waste using expanded perlite // *Waste Manag.* Elsevier Ltd, 2011. Vol. 31, № 8. P. 1772–1782.
48. Díez C. et al. Pyrolysis of tyres. Influence of the final temperature of the process on emissions and the calorific value of the products recovered // *Waste Manag.* 2004. Vol. 24, № 5. P. 463–469.
49. Kyari M., Cunliffe A., Williams P.T. Characterization of oils, gases, and char in relation to the pyrolysis of different brands of scrap automotive tires // *Energy and Fuels.* 2005. Vol. 19, № 3. P. 1165–1173.
50. Antoniou N., Zabaniotou A. Re-designing a viable ELTs depolymerization in circular economy: Pyrolysis prototype demonstration at TRL 7, with energy optimization and carbonaceous materials production // *J. Clean. Prod.* Elsevier Ltd, 2018. Vol. 174. P. 74–86.
51. Lewandowski W.M., Januszewicz K., Kosakowski W. Efficiency and proportions of waste tyre pyrolysis products depending on the reactor type—A review // *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* Elsevier, 2019. Vol. 140, № January. P. 25–53.
52. Shahi A., Dwivedi C., Manjare S. Experimental and theoretical investigation on pyrolysis of various sections of the waste tire and its components // *Chem. Eng. Res. Des.* 2021. Vol. 179.

53. Han J. et al. A modified temperature integral approximation formula and its application in pyrolysis kinetic parameters of waste tire // *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 2018. Vol. 40. P. 220–226.
54. Nisar J. et al. Pyrolysis of waste tire rubber: a comparative kinetic study using different models // *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 2020. P. 1–11.
55. Menares Tapia T. et al. Waste tires pyrolysis kinetics and reaction mechanisms explained by TGA and Py-GC/MS under kinetically-controlled regime // *Waste Manag.* 2019. Vol. 102. P. 21–29.
56. Iwarere S., Mkhize N. PYROLYSIS OF VARIOUS TYRE TYPES: CHARACTERISTICS AND KINETIC STUDIES USING THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS // *Detritus.* 2019. Vol. In Press. P. 1.
57. Hu Q. et al. Thermal behavior, kinetics and gas evolution characteristics for the co-pyrolysis of real-world plastic and tyre wastes // *J. Clean. Prod.* 2020. Vol. 260. P. 121102.
58. Dan L. et al. Study on the co-pyrolysis of waste tires and plastics // *Energy.* 2021. Vol. 226. P. 120381.
59. Yu S. et al. Mechanism analysis of gas products from catalytic pyrolysis of tire rubber based on reaction thermodynamics and kinetics // *Fuel Process. Technol.* 2022. Vol. 227. P. 107134.
60. Taleb D.A. et al. Insights into pyrolysis of waste tire in fixed bed reactor: Thermal behavior // *Mater. Today Proc. Elsevier Ltd.,* 2020. Vol. 31, № xxxx. P. 178–186.
61. Aylón E. et al. Waste tire pyrolysis: Comparison between fixed bed reactor and moving bed reactor // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008. Vol. 47, № 12. P. 4029–4033.
62. Cunliffe A.M., Williams P.T. Composition of oils derived from the batch pyrolysis of tyres // *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 1998. Vol. 44, № 2. P. 131–152.

63. Dai X. et al. Pyrolysis of waste tires in a circulating fluidized-bed reactor // *Energy*. 2001. Vol. 26, № 4. P. 385–399.
64. Jahirul M.I. et al. A review on the thermochemical recycling of waste tyres to oil for automobile engine application // *Energies*. 2021. Vol. 14, № 13. P. 1–18.
65. Akkouche N. et al. Heating rate effects on pyrolytic vapors from scrap truck tires // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Elsevier B.V., 2017. Vol. 123. 419–429 p.
66. Banar M. et al. Characterization of pyrolytic oil obtained from pyrolysis of TDF (Tire Derived Fuel) // *Energy Convers. Manag.* 2012. Vol. 62. P. 22–30.
67. Cheung K.Y. et al. Operation strategy for multi-stage pyrolysis // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. Elsevier B.V., 2011. Vol. 91, № 1. P. 165–182.
68. Lam K.L. et al. Modelling pyrolysis with dynamic heating // *Chem. Eng. Sci.* Elsevier, 2011. Vol. 66, № 24. P. 6505–6514.
69. Юсевич А.И., Малевич Н.Н., Генарова Т.Н. Получение Нефтехимического Сырья Из Резиновых Отходов Методом Термического Сольволиза // *Нефтехимия*. 2020. Vol. 60, № 4. P. 556–574.
70. U.S. Tire Manufacturers Association. 2021 US Scrap Tire Management Summary October 25, 2022 [Electronic resource]. URL: [https://www.ustires.org/sites/default/files/21 US Scrap Tire Management Report 101722.pdf](https://www.ustires.org/sites/default/files/21%20US%20Scrap%20Tire%20Management%20Report%20101722.pdf).
71. Additives for Polymers. Ceresana publishes updated study of the global carbon black market. 2021. 11 p.
72. DISCOVERY RESEARCH GROUP. Аналитический отчет DISCOVERY RESEARCH GROUP. Анализ рынка углерода технического в России [Electronic resource]. URL: <https://drgroup.ru/1545-analiz-rynka-tehnicheskogo-ugleroda-v-Rossii.html>.
73. Официальный сайт Федеральной государственной службы статистики (Росстат) [Electronic resource]. URL: <https://rosstat.gov.ru>.

74. ГОСТ 7885-86 Углерод технический для производства резины. Технические условия [Electronic resource]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009139>.
75. Carbon Black Price Trend and Forecast [Electronic resource]. URL: <https://www.chemanalyst.com/Pricing-data/carbon-black-42> .
76. Каталог техуглерода (сажи) [Electronic resource]. URL: <https://тех-углерод.рф/каталог-техуглерода-сажи/>.
77. Producer Price Index by Commodity: Chemicals and Allied Products: Carbon Black [Electronic resource]. URL: <https://fred.stlouisfed.org/series/WPU06790918> .
78. Yi Q. et al. Thermogravimetric analysis of co-combustion of biomass and biochar // J. Therm. Anal. Calorim. 2013. Vol. 112, № 3. P. 1475–1479.
79. Rago Y.P. et al. Co-combustion of torrefied biomass-plastic waste blends with coal through TGA: Influence of synergistic behaviour // Energy. 2022. Vol. 239.
80. Kim J.-H. et al. Influence of biomass pretreatment on co-combustion characteristics with coal and biomass blends // J. Mech. Sci. Technol. 2019. Vol. 33, № 5. P. 2493–2501.
81. Gil M. V. et al. Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion // Bioresour. Technol. Elsevier Ltd, 2010. Vol. 101, № 14. P. 5601–5608.
82. Wang D. et al. Thermogravimetric study of combustion of biomass and anthracite coal by iso-conversional method // J. Iron Steel Res. Int. Springer Singapore, 2018. Vol. 25, № 3. P. 330–339.
83. Khairy M. et al. The influence of torrefaction on the biochar characteristics produced from sesame stalks and bean husk // Biomass Convers. Biorefinery. 2023.

84. Liu Y. et al. Comparative study on the co-combustion behavior of torrefied biomass blended with different rank coals // Biomass Convers. Biorefinery. 2022.
85. Larionov K.V. et al. Combustion of bituminous coal loaded with copper salts // Fuel. 2021. Vol. 286. P. 119366.
86. Трудовой кодекс РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021);
87. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»;
88. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности»
89. МУ «Расчет искусственного освещения», ТПУ;
90. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение». Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*»
91. СН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация...»;
92. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. «Вибрационная болезнь. Общие требования»;
93. ГОСТ Р 22.0.01-2020 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях»;
94. ГОСТ 12.1.038-82. «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов».
95. ГОСТ 12.1.007-76 Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
96. СНиП 21-01-97 «Пожарная безопасность зданий и сооружений»;

## Приложение А

(справочное)

### Foreign sources

#### Co-combustion of carbon residue from pyrolysis of waste tires with biomass

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ11	Губин Артур Владимирович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ им. И.Н. Бутакова	К.Б. Ларионов	К.т.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы \_\_\_\_\_ (аббревиатура отделения (НОЦ) школы):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Соколова Эльвира Яковлевна	к.ф.н.		
Старший преподаватель ОИЯ ШБИП	Демидова Ольга Михайловна	-		



### 3 Results of experimental studies of co-combustion of carbon residue with petroleum coke and biomass

#### 3.1 Thermal analysis

Figure 16 shows the TG and DTG profiles of the studied samples of the carbon residue of waste tires and fuel composites based on it.

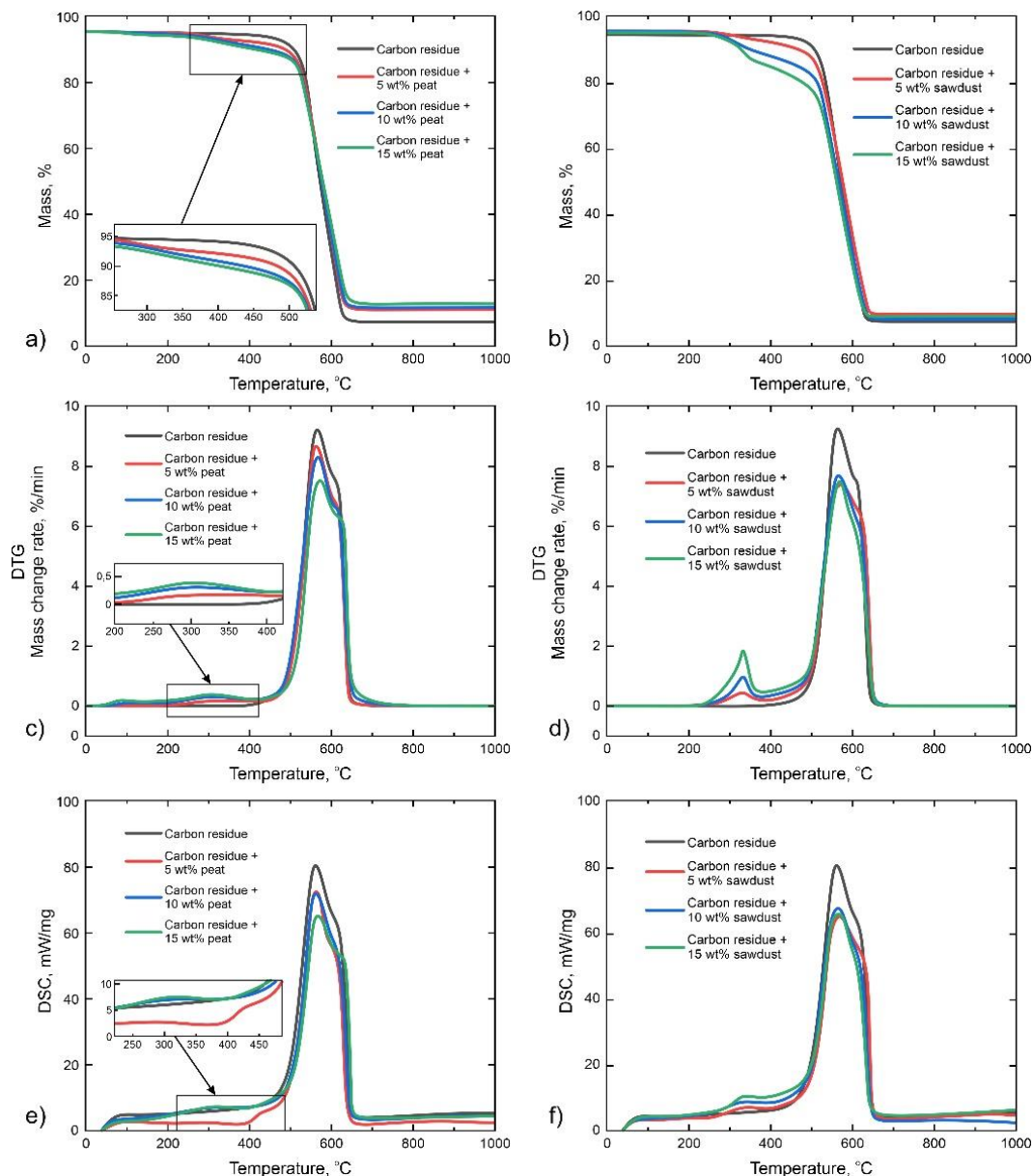


Figure 16 – TG (a, b), DTG (c, d) and DSC (e, f) oxidation profiles of the studied samples of waste tires, pyrolysis carbon residue and fuel composites based on it with different content of peat (a, c, e) and pine sawdust (b, d, f). Air consumption - 150 ml / min, heating rate - 10 ° C / min.

According to Figure 16, intensive oxidation of samples of spent carbon residue pyrolysis of tires occurred in the temperature range of 510-636 °C ( $T_i$  and

$T_f$ , respectively - Table 3). The addition of peat has a significant impact on the completeness of oxidation of this mixture. Thus, an increase in the proportion of peat to 15% in the mixture led to an increase in ash mass by 4.1%. The reason for this is the high ash content of peat compared to the studied carbon residue (22.8 and 15.5%, respectively). The addition of sawdust did not have a significant effect on the completeness of its oxidation (Table 3).

It should be noted that the addition of biomass (peat or sawdust) leads to a change in the shape of TG profiles with a more pronounced low-temperature oxidation region of low-boiling components, such as hemicellulose (200-370 °C), cellulose (275-400 °C) and lignin (more than 400 °C). The values of the onset of intensive oxidation corresponded well to the increase in the biomass proportion in the fuel composite (Table 3). The carbon residue profile of waste tyre pyrolysis is monomodal in shape with a characteristic maximum temperature of 565 °C and an oxidation rate of 9.26 %/min ( $T_{max}$  and  $w_{max}$ , respectively). However, with the addition of biomass, an additional peak appeared in the form of a characteristic arm of the main profile of DTG with the appearance of a clear phase of thermal decomposition in the low-temperature zone. An increase in the proportion of biomass in the composition led to a decrease in the rate of intensive oxidation in both cases (by 0.6 and 1.7 %/min, respectively), which was associated with an increase in the rate of release of volatile substances in the low-temperature region. Thus, the addition of biomass to the fuel composition led to the expansion of the oxidation region to the left by an average of 8-30 °C and an increase in the maximum temperature of intensive oxidation.

Such results are in good agreement with the literature data on the co-combustion of mixtures of coal and biomass [1], carbon and waste [2], coal and erode angle [3-5] or carbon and biomass [6]. Although the interactions between the components are widely recognized [1-7], the reasons for this behavior have yet to be determined due to their extreme complexity. The above-mentioned researchers have suggested that different oxygen adsorption rates are a possible cause [84], but no

evidence has been presented. The interaction between the emitted volatiles and the solid-phase components of the fuel is considered a key factor in this process, since the different content of volatile substances and the features of its release stage were the clearest differences between the behavior of peat and sawdust according to results of thermal analysis.

Table 3 - Oxidation parameters of coal and fuel compositions by thermal analysis.

Component	Mass, wt.%	T <sub>i</sub> , °C	T <sub>f</sub> , °C	in Макс. , %/min	T <sub>max</sub> , °C	∂m, %
Carbon residue	100	-/510.3	-/635.5	9.26	565.1	91.52.
Peat	5	302.5/515.1	471,1/632,5	8.69	562.5	88.02
	10	277.5/505.1	460.6/630.4	8.31	567.5	87.4
	15	272.5/502.5	452.5/635.1	7.55	570.1	86.11
Pine sawdust	5	325/507.5	472.5/637.5	0.6/7.4	335/575	89.66
	10	320.1/500.1	447.5/632	1.22/7.7	335/567.5	91.45
	15	317.5/502.5	452.5/627.5	1.87/7.5	332/570.1	90.52

Based on the foregoing, it can be noted that the use of biomass in the form of peat and pine sawdust did not lead to significant changes in the temperature characteristics of the oxidation of the carbon residue. This result allows us to conclude that there is a stable combustion, radiation and heat transfer to the heat exchange surfaces, regardless of the proportion of the organic component in the nominal mode of operation of the equipment.

### 3.2 Ignition and combustion

Figure 16 shows the results of determining the delay time  $\tau_i$  of the samples under study using a coolant in the combustion chamber at a temperature of 800 °C.

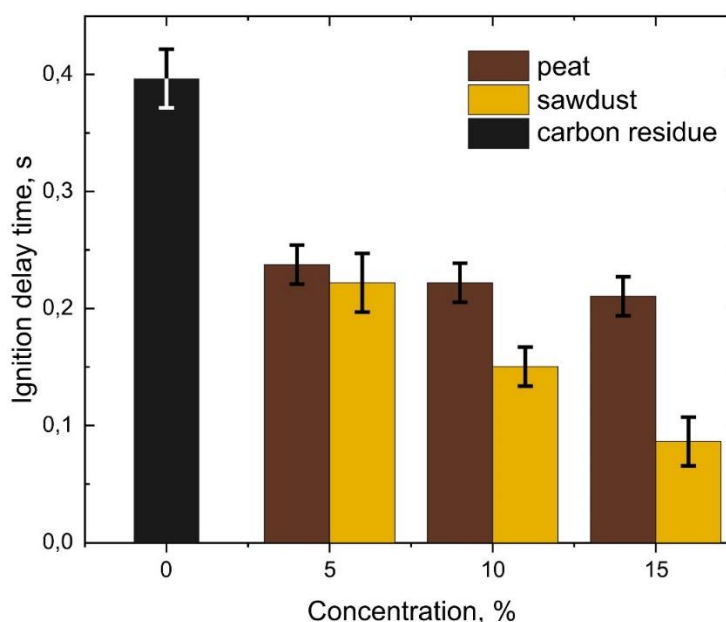


Figure 17 - Ignition delay time of the studied fuel samples at the coolant temperature  $T_g = 800$  ° C.

According to Figure 5, the increase in the biomass content in the form of peat and pine sawdust in the fuel composite led to a nonlinear reduction in the ignition delay time compared to the reference sample of the carbon residue of waste tyre pyrolysis. The introduction of a 5% wt.% addition of peat or sawdust led to a sharp decrease in the ignition delay time by about 40% from  $\sim 0.4$  s to 0.24 s. A further increase in the concentration of the peat additive did not lead to any strong effect - the ignition delay time of the sample with 15 wt.% of peat was less than the ignition delay time of the sample with 5 wt.% by less than 5%. On the contrary, an increase in the concentration of the additive to sawdust from 5 wt.% to 15 wt.% led to a decrease in the ignition delay time by about 2.5 times. Compared to the original sample, the strongest effect was achieved with the addition of pine sawdust (from 44 to 78% depending on the content). The decrease in the  $\tau_i$  parameter was explained by an increase in the reactivity of this mixture due to a significantly higher content of volatile substances (by 9.4 wt.%), lower humidity (by 2.9 wt.%) and a higher total

reactivity of sawdust during ignition (Table 5). The latter can be caused by the higher content of hemicellulose and cellulose in sawdust compared to peat, which has a high content of less reactive lignin.

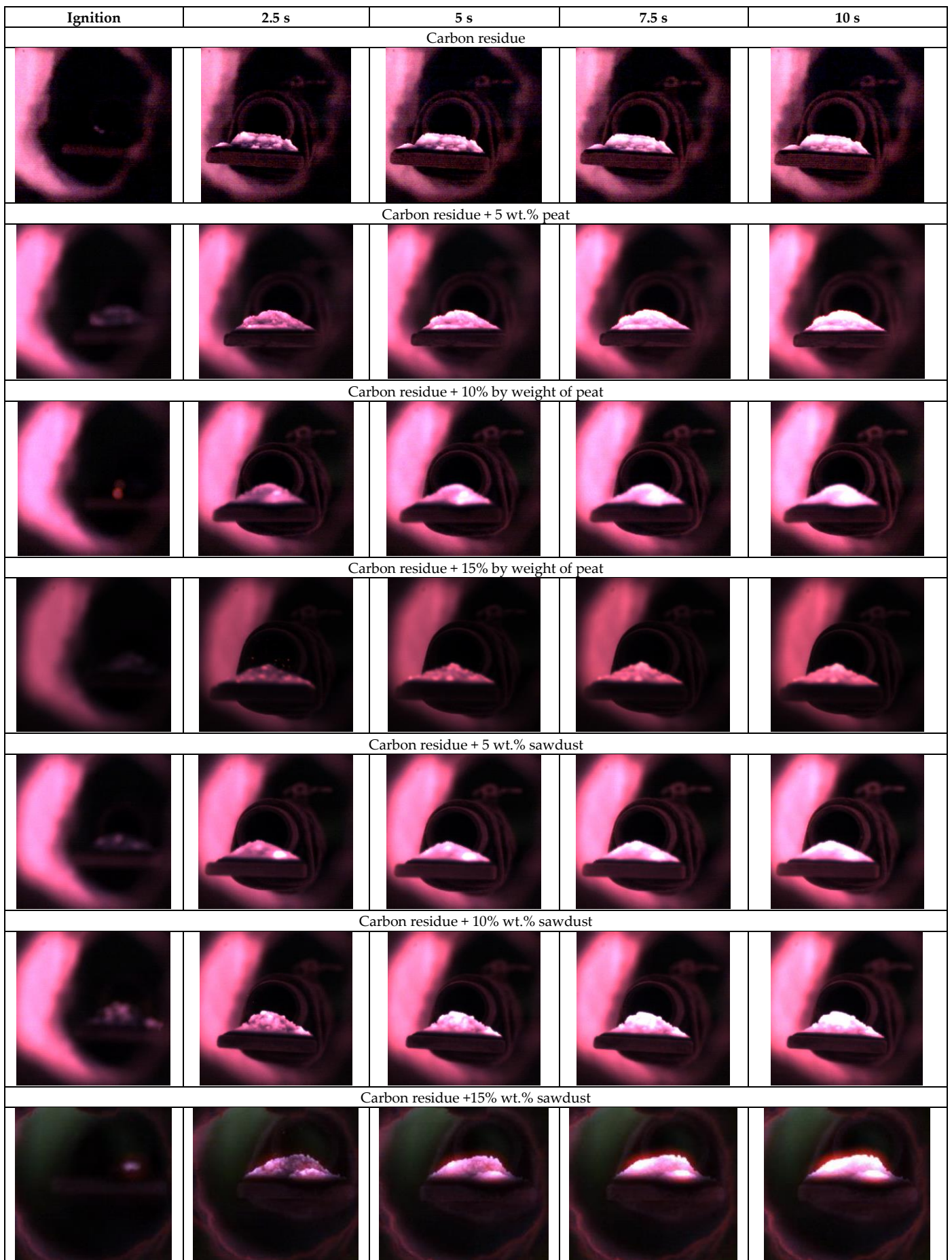


Figure 18 - Images of typical stages of the investigated ignition and combustion of fuel.

Figure 18 shows typical frames of ignition and subsequent combustion of fuel samples. With the help of the presented images, several stages of the combustion process can be distinguished. The first, which are usually distinguished in studies [8] – inert heating and moisture removal – in Figure 18 are not represented. The last stages - the simultaneous release and combustion of volatile substances with solid oxidation of carbon - occurred at the time of ignition. Ignition in this case can be characterized by the following mechanism: volatiles (mainly composed of organic origin, such as hemicellulose, cellulose and lignin) form a gas cloud in the vicinity of the fuel sample, which heats the fuel, thereby contributing to the stable combustion of the fuel. The results obtained are in good agreement with the data of thermal analysis (Fig. 16), which revealed an additional exothermic reaction of decomposition of the organic component in the low-temperature zone. The glow at the time of ignition was localized either from above or in the bulk of the sample. This indicates a significant contribution of both heterogeneous reactions on the surface of the sample and homogeneous reactions in its vicinity. The intensity of the glow increases over time, and its distribution becomes more uniform. While the contribution of gas-phase reactions near the sample surface increases with the volatile content of the mixture, the luminescence distribution for samples with a higher additive content was more uniform. However, this effect was rather weak.

The mechanism of ignition of samples containing peat was similar to the mechanism of samples with sawdust, but was characterized by less intense heat release at the initial stage of thermal decomposition of the fuel. This is also consistent with thermal analysis data (Fig. 16). It is also worth noting that an increase in the peat content of more than 5% by weight in the fuel composite did not lead to a significant reduction in the ignition delay time. While the ignition delay time for samples with 5 wt.% additives was quite close, and for samples with 15 wt.% additives it was the opposite (the ignition delay time for a sample with 15 wt.% peat was almost three times higher than for a sample with 15 wt.% sawdust), the general

features of combustion according to video recording data (Fig. 18) were very similar for all of them, which indicates a significant contribution of the additive in terms of increasing reactivity without affecting the overall mechanism.

### 3.3 Analysis of combustion products

Figure 19 shows the profiles characterizing the release of gas-phase combustion products (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub>) of the studied samples of fuel composites based on waste tires, pyrolysis carbon residue and biomass additives in the form of peat and pine sawdust.

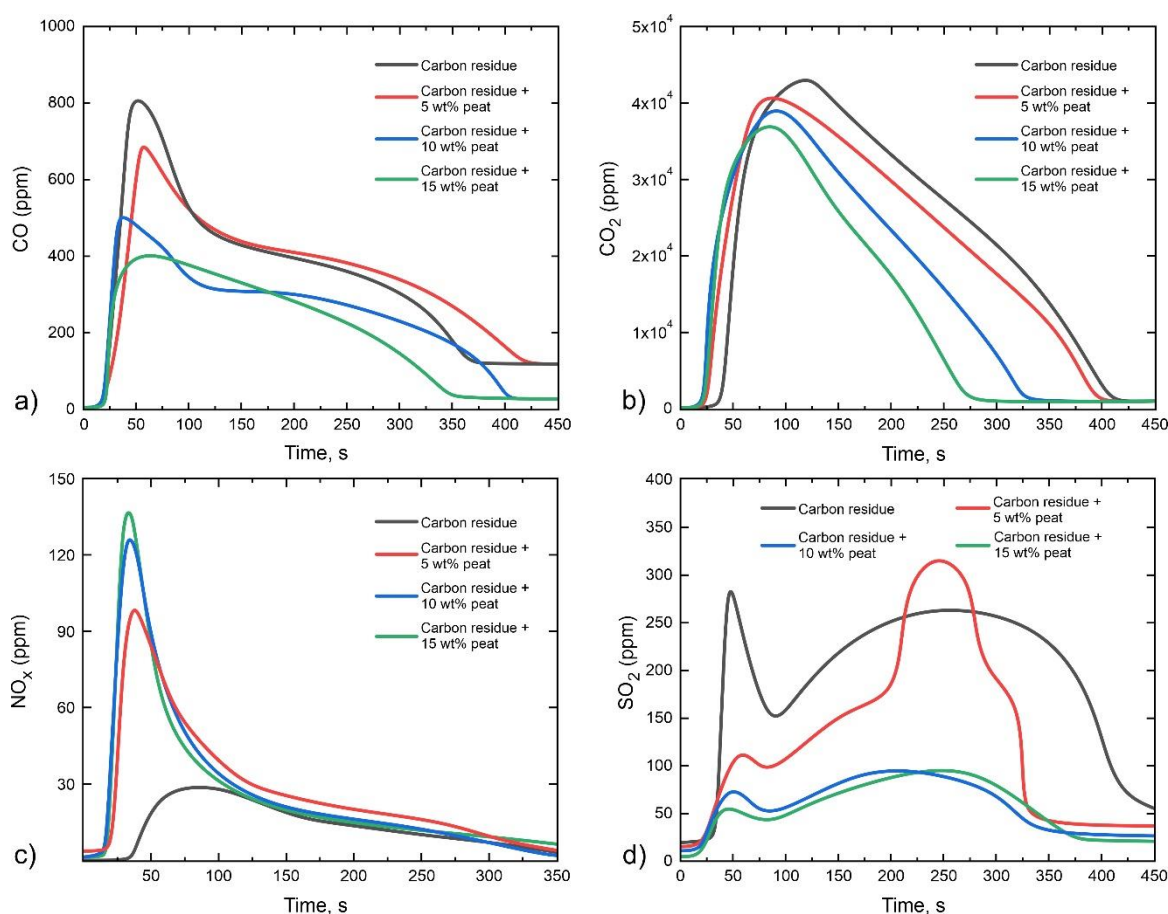


Figure 19 - The dependences of the release of gas-phase combustion products over time for the studied samples of the carbon residue of pyrolysis of waste tires and fuel compositions with a peat additive were revealed: a – carbon monoxide, b – carbon dioxide, c – nitrogen oxide, d – sulfur oxide.

Analysis of the data presented in Fig.19 allows us to identify a significant effect of peat on the nature of the formation of gas-phase combustion products. With



an increase in the peat content in the fuel composite, there is a decrease in the intensity of carbon monoxide formation, which corresponded to the elemental composition of the original components, in particular, a lower carbon content in both sawdust and peat compared to the carbon residue. However, the increase in the observed peak concentrations of nitrogen oxides was associated with an intensification of the combustion rate of the fuel composite. Thus, an increase in the peak concentration of nitrogen oxides in samples of pyrolysis carbon residues of waste tires with peat additive may be associated with the intensive formation of thermal nitrogen oxides at the initial stage of combustion.

The profiles of sulfur oxide concentrations had a bimodal shape with an obvious tendency to decrease emissions with an increase in the proportion of biomass components. The greatest effect was achieved at the stage of carbon residue incineration and was expressed both in the general narrowing of the emission range (starting from 5% by weight of peat additive) and in the reduction of peak concentrations. It was also observed that at higher concentrations of peat additive, these effects were stronger. The decrease in the concentration of sulfur oxides was caused by its binding and preservation in solid form into the ash residue.

The graphs show that the flow of thermal nitrogen to total emissions of nitrogen oxides is practically independent of the concentration and type of biomass additive. A significant conclusion from the data presented is that the additive of 5 wt.% in the form of peat and 10 wt.% additive in the form of pine sawdust was optimal for the production of fuels with low emissions of sulfur oxides. It has been established, that a further increase in the fuel additive has a weak effect on the environmental characteristics of such fuel, but, according to the results of thermal analysis, has a stronger negative effect on the energy value of the fuel composite. The change in CO emissions may be due to the different reactivity of the volatile substance components. The main mechanism for reducing emissions CO<sub>2</sub> is explained by the lower sulfur content in the biomass, despite the small synergistic

effects, which can be explained by the interaction between the components of the ash and the combustion products in the gas phase.

## **Bibliography**

- [1] Yi Q. et al. Thermogravimetric analysis of co-combustion of biomass and biochar // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2013. Vol. 112, № 3. P. 1475–1479.
- [2] Rago Y.P. et al. Co-combustion of torrefied biomass-plastic waste blends with coal through TGA: Influence of synergistic behaviour // *Energy.* 2022. Vol. 239.
- [3] Kim J.-H. et al. Influence of biomass pretreatment on co-combustion characteristics with coal and biomass blends // *J. Mech. Sci. Technol.* 2019. Vol. 33, № 5. P. 2493–2501.
- [4] Gil M. V. et al. Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion // *Bioresour. Technol.* Elsevier Ltd, 2010. Vol. 101, № 14. P. 5601–5608.
- [5] Wang D. et al. Thermogravimetric study of combustion of biomass and anthracite coal by iso-conversional method // *J. Iron Steel Res. Int.* Springer Singapore, 2018. Vol. 25, № 3. P. 330–339.
- [6] Khairy M. et al. The influence of torrefaction on the biochar characteristics produced from sesame stalks and bean husk // *Biomass Convers. Biorefinery.* 2023.
- [7] Liu Y. et al. Comparative study on the co-combustion behavior of torrefied biomass blended with different rank coals // *Biomass Convers. Biorefinery.* 2022.
- [8] Larionov K.B. et al. Combustion of bituminous coal loaded with copper salts // *Fuel.* 2021. Vol. 286. P. 119366.