



На правах рукописи

Бел

Белоногов Максим Владимирович

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПИРОЛИЗ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ,
ПРИГОТОВЛЕННЫХ ИЗ НИЗКОКАЛОРИЙНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
ТОПЛИВ И МАСЕЛ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Егоров Роман Игоревич

доктор физико-математических наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Палецкий Александр Анатольевич

доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория кинетики процессов горения, ведущий научный сотрудник

Богомоллов Александр Романович

доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», кафедра теплоэнергетики Института энергетики, заведующий кафедрой теплоэнергетики

Защита диссертации состоится «24» декабря 2024 года в 11:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.06 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, Россия, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.06
доктор технических наук, доцент

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'ТМ' or similar stylized letters.

Глушков Дмитрий Олегович

Общая характеристика работы

С каждым годом человечество потребляет все большее количество энергии. В основном, это обусловлено как развитием промышленности, инфраструктуры и экономическим ростом государств, так и общим ростом потребностей из-за роста населения Земли. Человечество с 1990 по 2008 года стало потреблять на 10 % больше электроэнергии на душу населения. Расход электроэнергии по регионам увеличился на 170 % на Ближнем Востоке, в Китае на 146 %, в Индии на 91 %, в Африке на 70 %, в США на 20 %, в Европейском Союзе на 7 %, при этом по миру в целом он вырос на 39 %. В России так же наблюдается существенный рост потребления энергии, в связи с ростом промышленного сектора, транспортной инфраструктуры и населения. Рост потребления энергии влечет за собой ухудшение экологической ситуации по всему миру, что стимулирует глобальный интерес к развитию более чистых топливных технологий.

Самым востребованным топливом для производства электроэнергии является уголь. Электростанции потребляют большое количество угля, в следствии чего происходит накопление твердых отходов и увеличение количества выбросов CO_2 в атмосферу. Большой объем твердых отходов ежегодно попадает в биосферу, что наносит непоправимый урон экологии. Рост загазованности атмосферы в крупных городах приводит к резкому росту заболеваний органов дыхания, подталкивая государства к проведению исследований по внедрению новых, экологически чистых технологий производства электроэнергии.

Многие страны мира массово используют природный газ в качестве топлива на электростанциях. Строительство и модернизация имеющихся электростанций для работы на природном газе требует относительно небольших затрат. КПД станций, работающих на газе, составляет 55-60 %, в отличие от 32-34 % КПД станций, работающих на угле. Газ является экологически более чистым топливом, чем твердые топлива. К тому же, он обладает большей удельной теплотой сгорания, по сравнению с углем. В конечном счете, переход электростанций на газообразное топливо помогает снизить количество вредных выбросов в атмосферу на 50-70 %. Однако, согласно большинству прогнозов, запасов природного газа в месторождениях, разрабатываемых на данный момент, хватит приблизительно на 130 лет.

Одним из путей сокращения загрязнения атмосферы является использование технологий, основанных на ядерном распаде тяжелых элементов, а также использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). На данный момент ядерная энергетика используется в 31 стране мира, и ее доля в мировой энергетике занимает 17 %. Большая часть атомных станций находятся на территории стран Европы, Северной Америки, Китая и России. В общей сложности в РФ введены в эксплуатацию 11 АЭС общей мощностью 30,3 ГВт (около 19 % от всей выработки электричества). Серьезные аварии (Чернобыльская АЭС, АЭС Фокусима-1), а также дороговизна постройки атомных станций заставили некоторые страны остановить свои ядерные программы.

Параллельно с переходом на безуглеродное топливо идет разработка новых технологий применения возобновляемых источников энергии. В первой четверти XXI века активно развиваются солнечная, ветровая и геотермальная энергетика, гидроэнергетика, а также использование в качестве топлива различных биомасс. К росту доли возобновляемой энергетики привели масштабные программы в странах Европы, США, Ки-

тае, Японии и Австралии. Однако, альтернативная энергетика обладает рядом недостатков, главным из которых является зависимость от природных факторов (погода, суточные и сезонные колебания мощности). Также затраты на передачу в сеть и диспетчеризацию электроэнергии от ВИЭ намного превышают затраты, возникающие при использовании традиционных источников электроэнергии.

Для удовлетворения растущего спроса на тепловую и электрическую энергию в энергетический цикл предлагается ввести новые виды топлива. Мало востребованные и низкокалорийные топлива (бурый уголь, торф) становятся все более привлекательными энергетическими ресурсами вследствие того, что многие государства стараются развивать энергетику с опорой на местные ресурсы. Огромные залежи торфа на территории России, а также малоиспользуемые бурые угли позволяют закрыть потребности энергетики в ряде регионов. Однако, массовое введение в промышленность технологий сжигания таких топлив требует сильной модернизации действующего оборудования. Масштабное внедрение таких топлив требует проведения исследований, направленных на поиск альтернативных процессов их использования и поиска оптимальных параметров для этих процессов.

Анализ публикаций за последние 10 лет позволяет сделать заключение, что разработан ряд оптимизированных технологий для сжигания торфа и бурого угля. В первую очередь разрабатываются методики приготовления топлива и его сжигания в топках котельных. В таких методиках часто предлагается использовать композиционное топливо на основе торфа и бурого угля. В качестве жидкого компонента добавляются различные горючие масла. Были разработаны математические модели протекания процессов горения и пиролиза смесевых топлив. В ряде работ предлагается добавлять к исходным топливам катализаторы, для увеличения скорости нагрева и продолжительности высокотемпературного окисления. Использование бурого угля и торфа в составе смеси с компонентом, позволяющим улучшить характеристики горения, позволяет расширить сферу применения таких топлив. Однако внедрение смесевых топлив требует дополнительной переделки действующих агрегатов с учетом особенностей топливных смесей.

Добавление в топливную смесь отходов и возобновляемых компонентов, таких как отработанные моторные масла и смеси растительных масел, позволяет сократить расход исчерпаемых ресурсов и повысить энергетические показатели смеси за счет высокой энергетичности масел.

Достаточно удобным способом применения смесей на основе торфа и бурого угля в энергетике является их переработка в генераторный газ. Такой подход позволяет получить газ, с достаточно высокой теплотой сгорания. В дальнейшем этот газ может применяться в топках имеющихся газовых котлов. Наиболее популярными методами пиролиза твердых топлив на данный момент являются автотермические методы, в которых за счет частичного сжигания топлива выделяется тепло, необходимое для пиролиза основной массы. Однако, для повышения производительности процесса пиролиза при работе с низкокалорийными топливами могут применяться и аллотермические технологии, когда для нагрева топлива используется тепло от внешнего источника. Самым распространенным в мире источником относительно дешевого тепла, пригодного для подогрева топлива, является излучение Солнца, для использования которого можно применять солнечные концентраторы различной конструкции. Однако, процессы пиролиза смесей из низкокалорийных ископаемых топлив и различных масел под действием

интенсивного стороннего нагрева исследованы недостаточно, как с точки зрения выбора оптимальных составов смесей, так и в плане наиболее удобных режимов нагрева.

Цель диссертационной работы – выявление основных закономерностей физико-химических процессов, протекающих при пиролизе топливных смесей, состоящих из горючего масла и низкокалорийных ископаемых топлив (торфа или бурого угля), под действием мощного светового потока с определением компонентного состава смеси и условий её пиролиза, при которых обеспечивается максимальное соотношение концентраций горючих и негорючих газообразных продуктов пиролиза.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих **задач**:

1. Разработка экспериментальной методики пиролиза топливных смесей, на основе торфа или бурого угля с добавлением масла. Создание экспериментального стенда, планирование и проведение экспериментальных исследований.

2. Анализ закономерностей протекания процесса термического разложения топливных смесей, на основе торфа или бурого угля с добавлением масла, под действием мощного светового потока, определение минимальных значений интенсивности светового потока, при которых возможен пиролиз, оценка влияния интенсивности излучения на состав газовой смеси.

3. Установление составов топливных смесей, на основе торфа или бурого угля с добавлением масла, обеспечивающих наибольшее соотношение горючих и негорючих компонентов в полученной смеси пиролизных газов.

4. Исследование термических свойств компонентов топливных смесей, а также готовых смесей, обеспечивающих максимальное производство горючих пиролизных газов.

5. Оценка удельных затрат энергии на пиролиз масло-торфяных и масло-буроугольных смесей под действием мощного светового потока.

Научная новизна диссертационной работы состоит в выявлении основных закономерностей физико-химических процессов, протекающих при пиролизе композиционных топлив на основе торфа и бурого угля с добавлением масла под воздействием светового потока высокой интенсивности.

Теоретическая значимость работы. Полученные результаты экспериментальных исследований процессов пиролиза топливных смесей, состоящих из низкокалорийного твердого компонента и возобновляемого растительного масла, представляют новые знания об условиях и характеристиках процессов термического разложения топливных смесей. Установлены закономерности процессов термохимической конверсии в ходе аллотермического нагрева поверхности топливной смеси. Показаны основные закономерности процессов образования генераторного газа. Показаны условия, обеспечивающие протекание эффективного пиролиза.

Практическая значимость работы. Предложенные в работе подходы и методики позволяют сформировать основные принципы для практической реализации процесса переработки низкосортных топлив с добавлением растительного компонента под действием светового потока высокой интенсивности. В работе выяснен уровень затрат энергии на пиролиз таких топлив, определены соотношения компонентов смесевых топлив, которые обеспечивают наибольшее соотношение горючей и негорючей части полученной газовой смеси. А также проведена общая оценка энергетической эффективности процесса гелио-термального пиролиза масло-торфяных и масло-буроугольных смесей.

Методология и методы исследования. Для определения удельной теплоты сгорания использовался метод бомбовой калориметрии. Оценка характерных температур процесса пиролиза производилась при помощи тепловизоров PI1M и Testo 885-2. Оценка производительности процесса по массе использовались аналитические весы Vibra AF 225DRCE. Для анализа состава газообразных продуктов пиролиза использовались оптические и электрохимические датчики газоанализатора.

Положения и основные результаты, выносимые на защиту:

1. Смеси торфа и масла, а также смеси бурого угля и масла, содержащие более 30 мас. % низкокалорийного ископаемого топлива, обладают удельной теплотой сгорания, превышающей суммарную теплоту сгорания компонентов.
2. Наибольшее производство горючих газов происходит при пиролизе смесей из торфа и масла, а также смесей из бурого угля и масла, когда доля масла достигает 65 мас. % и 40 мас. % соответственно.
3. Пиролиз топливных смесей, содержащих 35 мас. % торфа и 65 мас. % масла, а также 60 мас. % бурого угля и 40 мас. % масла, возможен только в условиях нагрева высокой интенсивности (более 300 Вт/см²).

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением части результатов исследований с известными данными, опубликованными другими авторами. Использованием в процессе исследований современных высокоточных средств измерений. Оценкой систематических и случайных погрешностей проведенных измерений.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования выполнены в рамках исследовательской программы госзадания «Наука» проект № 2.0001.ГЗБ.2023, гранта Российского фонда фундаментальных исследований «Оценка жизненного цикла снижения выбросов CO₂ путем энергоэффективного пиролиза и газификации композиционной биомассы» (№ 19-53-80019), программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета Приоритет-2030, № Приоритет-2030-ЭБ-018-202-2024 (соглашение № 075-15-2024-202 от 06.02.2024) «Мультитопливные технологии замкнутого цикла для энергоустановок и двигателей» (номер госрегистрации ЕГИСУ НИОКТР ЦИТиС: 124071600016-2), «Разработка оптимизированных методик конверсии горючих промышленных отходов для создания альтернативных топлив» (ВИУ-ИШФВП-299/2018), «Разработка экологически выгодных аллотермических методик утилизации горючих отходов углеобогащения с попутной выработкой тепловой энергии» (ВИУ-ИШФВП-197/2019).

Личный вклад автора заключается в планировании, подготовке и проведении экспериментальных исследований; обработки экспериментальных данных, построение зависимостей и анализ полученных результатов; оценке систематических и случайных погрешностей; формулировании практических рекомендаций; апробации результатов на научных конференциях и их опубликовании в рецензируемых периодических научных изданиях; формулировке основных защищаемых положений и выводов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на Восемнадцатой всероссийской (десятой международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2023» (г. Иваново); XXVII Международном молодежном научном симпозиуме имени академика М.А. Усова, посвященного 160-летию со дня рождения академика В.А. Обручева и 140-летию академика М.А. Усова, основателям Сибирской

горно-геологической школы (г. Томск); Семнадцатой всероссийской (девятой международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2022» (г. Иваново); XI Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлив: теория, эксперимент, приложения» (г. Новосибирск); XXV Международном симпозиуме имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященной 120-летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета (г. Томск).

Публикации. Материалы диссертационной работы опубликованы в 5 научных трудах, включая 1 работу в рецензируемом журнале, рекомендованном ВАК РФ (Химия твердого топлива), 4 статьи в международных журналах, индексируемых в SCOPUS (Applied Sciences, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Ugol), 5 сборников материалов конференций различного уровня.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 124 страницах, состоит из введения, 5 глав, основных результатов и выводов, списка литературы, включающего 127 наименований, содержит 9 таблиц, 30 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, а также практическая и теоретическая значимость работы, научная новизна, достоверность результатов и личный вклад автора.

В первой главе представлен обзор основных свойств топлив, которые используются в тепловой энергетике. Рассмотрены основные особенности методик сжигания различного типа топлив и их развитие в исторической перспективе. Отмечены основные преимущества и недостатки топлив, а также указаны причины перехода на новые топлива. С ростом потребления ископаемого топлива в течение ряд последних десятилетий выявилась проблема истощаемости не возобновляемых энергоресурсов, обуславливающая возникновение дефицита топлива в мировой экономике. Приведен обзор основных путей использования возобновляемых источников энергии и горючих отходов, позволяющих смягчить проблему дефицита топлив. Также рассмотрены основные тренды использования горючих биомасс в промышленности, электроэнергетике и в качестве моторного топлива.

В работе проанализированы особенности самых популярных способов получения тепловой энергии из ископаемого топлива. Наиболее популярным способом является сжигание (слоевое, в кипящем и псевдоожиженном слое, факельное и цокольное). Особенности самых востребованных технологий пиролиза проанализированы в разрезе их применимости к переработке низкокалорийных ископаемых топлив и горючих биомасс. Проведен анализ основных освоенных методов использования смесевых топлив, а также перспективных разрабатываемых в настоящее время методик.

Во второй главе описаны способы изучения закономерностей процесса пиролиза смесевых топлив при воздействии сфокусированного мощного светового потока от галогенной лампы. В разделах 2.1 и 2.2 описаны физико-химические особенности топливных смесей, содержащих возобновляемый компонент, состоящих из торфа с добавлением масла, либо бурого угля с добавлением масла, а также методика их приготовления.

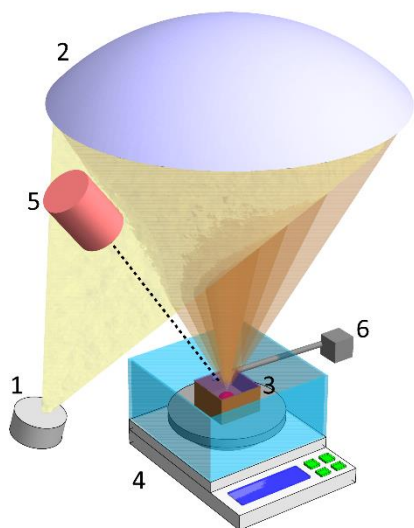


Рисунок 1 – Модель экспериментального стенда

Рапсовое масло служит удобным модельным компонентом, позволяющим выяснить основные закономерности пиролиза смесей низкокалорийных топлив и различных синтетических масел. Торф, используемый в работе, собран на месторождении Суховское, расположенного в Томской области. Бурый уголь марки Б2, использованный в работе, добывался на одном из месторождений Красноярского края. Твердые компоненты топливной смеси были измельчены на роторной мельнице и просеяны через сито для получения порошка с размером частиц, не превышающим 120 мкм.

Для исследований был собран экспериментальный стенд, представленный на рис. 1, в котором применялся комплекс измерительных средств (4, 5, 6) способный решать задачи мониторинга температуры пиролиза смеси, анализа состава получаемых газов, а также об-

щей оценки производительности процесса по изменению массы образца. Нагрев смеси осуществлялся сфокусированным с помощью параболического зеркала (2) излучением галогеновой лампы (1). В освещенной области на поверхности топлива (3) обеспечивалась интенсивность светового потока до 1000 Вт/см^2 , с учетом коэффициента поглощения света топливом ему соответствуют тепловые потоки до $400\text{--}500 \text{ Вт/см}^2$.

Кроме того, свойства смесевых топлив анализировались с использованием методов ТГА и бомбовой калориметрии.

В третьей главе представлены результаты исследования процессов термического разложения смесей на основе торфа с добавлением масла. Были проанализированы свойства компонентов смесевоего топлива, а также проведены исследования по определению оптимального состава смеси с точки зрения максимальной выработки горючих газов в результате пиролиза. Было показано, что такой максимум достигается, когда соотношение торфа и масла достигает 35:65.

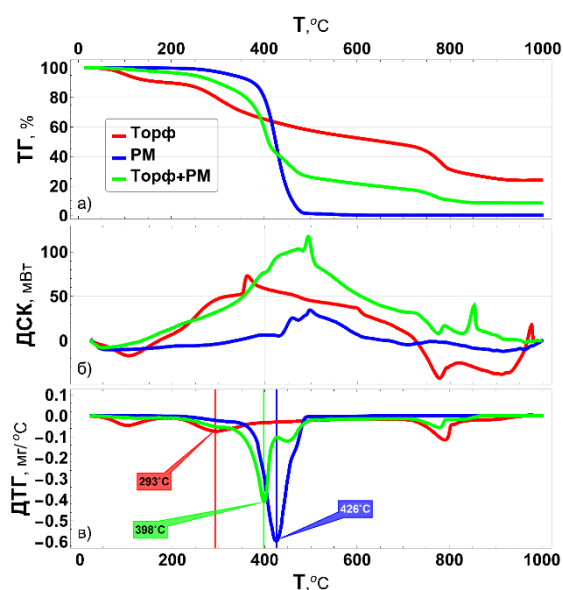


Рисунок 2 – Результаты ТГА исследования для торфа, масла и смеси (65 мас. % масла)

На рис. 2 показаны результаты термогравиметрического исследования процесса термического разложения чистого торфа, чистого масла, а также их смеси (содержащей 65 мас. % масла). Исходя из результатов, можно сделать вывод, что пиковая скорость разложения чистого торфа наблюдается при температурах $\sim 293^\circ\text{C}$, тогда как масло имеет максимальную скорость термического разложения при $\sim 426^\circ\text{C}$. Для обоих чистых компонентов тепловые эффекты разложения имеют пики, соответствующие максимальной скорости потери массы. Максимум в зависимости ДСК для масла (PM) наблюдается при 475°C . Таким образом, максимальное тепловыделение масла наблюдается при температурах свыше 500°C . Как правило, при нагреве низкой интенсивности к моменту достижения таких тем-

ператур большая часть торфа уже сгорает. Композитное топливо с оптимальным для максимизации производства горючих газов соотношением компонентов (при 65 мас. % масла) показывает несколько иную кинетику термического разложения. Максимальная реакционная способность находится при температуре около 398 °С, но пик тепловыделения приходится на температуры, свыше 500 °С. Это означает, что такое топливо способно к довольно слабому самоподдерживающемуся горению, особенно при низкой концентрации кислорода вблизи его поверхности. Тем не менее, его можно эффективно пиролизовать при использовании стороннего нагрева, обеспечивающего поддержание температур свыше 500 °С.

На рис. 3 приведены измеренные на бомбовом калориметре значения высшей теплотворной способности для компонентов топлива и для топливной смеси с 65 мас. % масла. Из рисунка следует, что теплотворная способность композитного топлива (~37 МДж/кг) заметно выше, чем это можно предположить при оценке по аддитивным соотношениям компонентов. Этот факт отражает наличие достаточно сильного синергетического эффекта при совместном горении компонентов смеси, когда длительно достигаются температуры недоступные твердым компонентам самим по себе. Составу, содержащему 65 мас. % масла, соответствует локальный максимум скорости химических реакций относительно топлив с другим соотношением торф-масло (наиболее быстрые изменения массы навески). Синергетический эффект от смешения компонентов здесь выглядит максимальным. При воспламенении торфа, нагретого светом, появляется дополнительный нагрев, который позволяет вовлекать в процесс больше масла. Однако тление торфа в ходе процесса становится слишком слабым, если композиция содержит 70 мас. % и более масла.

Топливные смеси с низкой концентрацией масла достигают максимальных температур в течение короткого времени в начале прогрева. Увеличивая содержание масла, можно максимально увеличить продолжительность высокотемпературной части пиролиза. Видно, что конечные значения оранжевой или синей кривой соответствуют влиянию только внешнего нагрева, когда окисление топлива в основном закончилось. С другой стороны, повышение температуры выше этого значения происходит за счет теплоты реак-

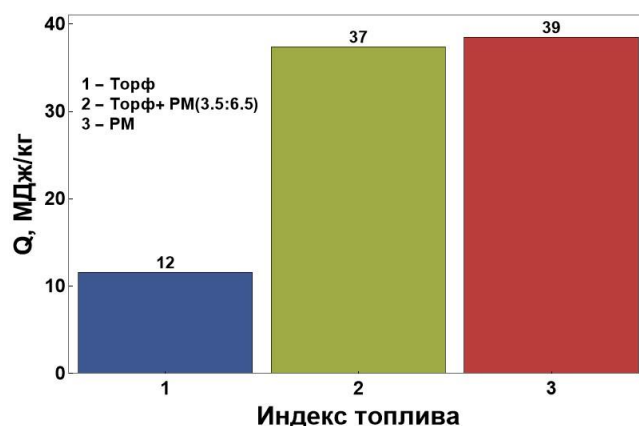


Рисунок 3 – Теплотворная способность чистых топлив и их смеси

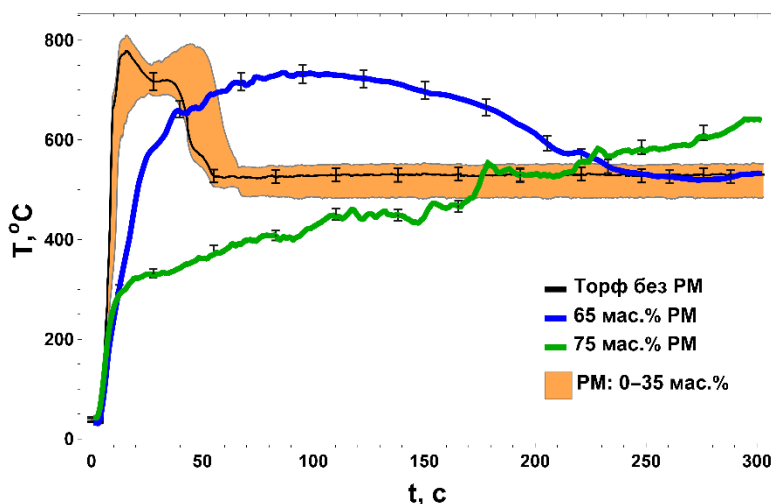


Рисунок 4 – Изменение температуры поверхности топливной смеси со временем в процессе пиролиза топливной смеси на основе торфа с добавлением масла (до 75 мас. %) под действием сфокусированного света

ции окисления. Следовательно, максимальное задействование теплоты химических реакций происходит при содержании в топливе 65 мас. % масла. При содержании масла 70 мас. % и выше высокотемпературный участок пропадает из-за больших потерь тепла на испарение летучих компонентов масла.

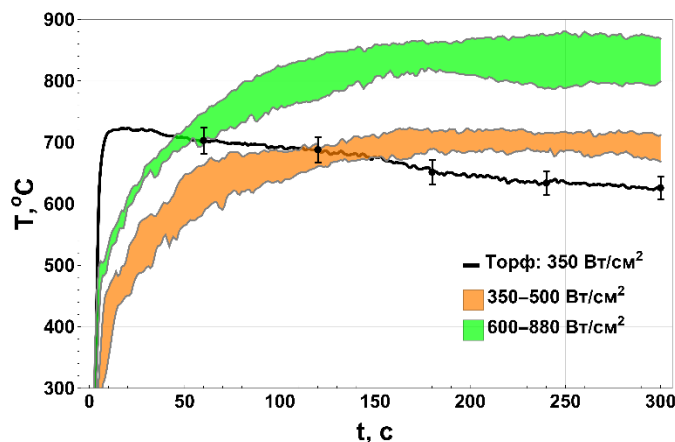


Рисунок 5 – Изменение температуры поверхности топливной смеси со временем в процессе пиролиза топливной смеси на основе торфа и масла под действием сфокусированного света

Общая производительность газогенерации оценивалась путем мониторинга динамики массы образца топлива в ходе процесса пиролиза. По результатам экспериментов были выявлены три семейства кривых, соответствующих разным режимам пиролиза (рис. 6). Однородный торф показывает самую быструю потерю массы при пиролизе, а общая масса образующихся газов самая высокая в целом (синяя кривая). Это происходит из-за относительно высокой реакционной способности торфа по сравнению с композиционным топливом. Быстрое повышение температуры до 600-800 °C инициирует интенсивное газообразование, но эти газы состоят в основном из CO_2 .

Второй режим пиролиза отмечен для композиций с долей масла в пределах 30-65 мас. %. Наивысший уровень выхода полученных газов здесь достигает значений около 80 % от показателя для однородного торфа. Третий режим свойственен для смесей с высокой долей масла. Средняя производительность генерации газа здесь в три

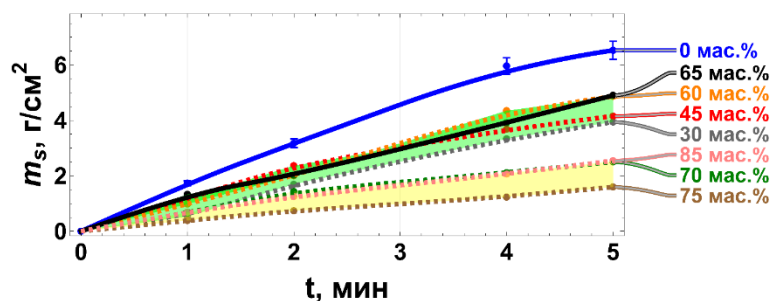


Рисунок 6 – Выход массы газовой смеси топлива со временем в процессе пиролиза топливной смеси на основе торфа при разных концентрациях масла под действием сфокусированного света

При исследовании влияния интенсивности светового потока на протекание пиролиза топливной смеси (рис. 5) было выявлено, что с увеличением интенсивности светового потока планомерно увеличивается температура пиролиза. Для эффективного пиролиза смеси необходим световой поток, не менее 600 Вт/см². Данный уровень светового потока обеспечивает достижение температур, достаточных для эффективного окисления смесового топлива. Меньшая интенсивность светового потока обеспечивает преимущественно испарение летучих компонентов масла.

раза ниже, чем на однородном торфе. Эти группы кривых имеют схожие тенденции с набором зависимостей, представленных на рис. 5. Семейство нижних кривых описывает испарение летучих компонентов масла. Кривые, соответствующие концентрациям масла в диапазоне 30-65 мас. %, соответствуют диапазону наиболее эффективного пиролиза топливной смеси.

При исследовании пиролиза топливной смеси при различных интенсивностях нагрева (рисунок 7) было выявлено, что зависимости массы полученных газов от времени в основном линейные. Кривые разделены на два семейства, верхнее соответствует термохимической переработке топлива в генераторный газ, а нижнее – преимущественному испарению выделяющихся при нагреве летучих компонентов масла. Порог интенсивности, определяющий переход между семействами кривых, составляет около 650 Вт/см^2 . Это значение интенсивности светового потока, при котором достигается минимально необходимая температура для начала интенсивного окисления топливной смеси.

Основной целью пиролиза является превращение исходной топливной смеси в смесь горючих газов. При заданной интенсивности нагрева состав генераторного газа может меняться в зависимости от содержания масла в составе топливной смеси. За исключением азота, содержащегося в воздухе, основными компонентами полученной газовой смеси являются CO , CO_2 , CH_4 . Глядя на концентрации оксидов углерода, можно увидеть, что соотношение горючего CO и негорючего CO_2 приближается к 1:1 с увеличением концентрации масла. Этот факт можно объяснить увеличением средней температуры процесса при снижении теплопроводности смеси. Видно, что увеличение доли масла приводит к общему снижению газообразования (более чем в три раза при содержании масла выше 60 мас. %). Однако соотношение горючего и негорючего компонентов газовой смеси при этом возрастает (рис. 8в). Горючие компоненты становятся преобладающими, когда соотношение масло-торф приближается к 2:1.

Это происходит из-за значительного снижения выхода CO_2 . По результатам газоанализа видно, что производительность образования предельных углеводородов становится существенной именно тогда, когда количество масла достаточно велико. Значения, представленные на рис.8 были получены путем интегрального усреднения измеренных концентраций газов за время пиролиза топлива.

Увеличение концентрации масла свыше 65 мас. % приводит к резкому снижению образования оксидов углерода и, следовательно, пиролиз таких топлив

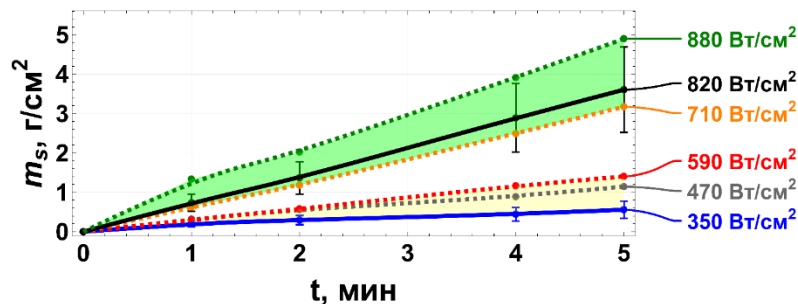


Рисунок 7 – Выход массы газовой смеси топлива со временем в процессе пиролиза топливной смеси на основе торфа при разных интенсивностях под действием сфокусированного света

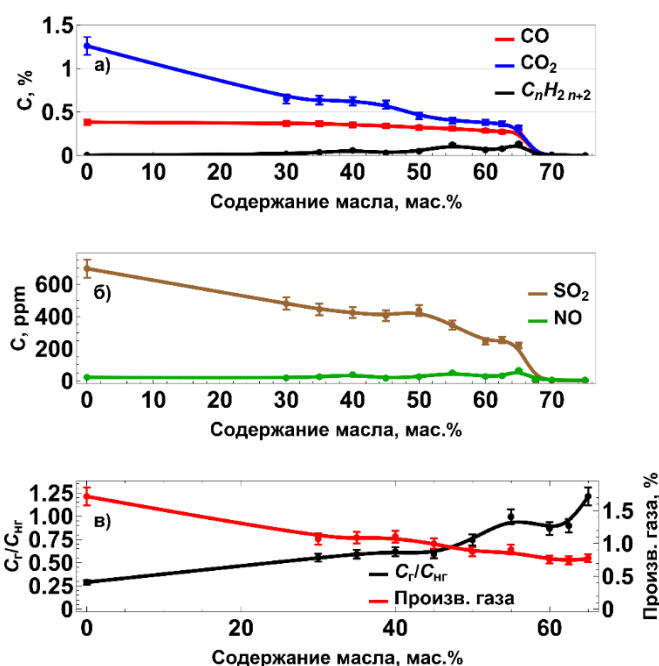


Рисунок 8 – Изменение концентрации компонентов газовой смеси в процессе пиролиза топлива на основе торфа с маслом при разных концентрациях под действием сфокусированного света

практически прекращается. Происходит только испарение летучих компонентов, получающихся при нагреве масла.

Образование вредных оксидов (NO_x , SO_2) вначале имеет достаточно стабильный уровень с последующим явным снижением при росте концентрации масла до 65 мас. %. Этот факт связан с двумя причинами: уменьшением количества серы в составе смеси при росте доли масла и повышением средних температур. Эти конкурирующие эффекты в конечном итоге приводят к концентрациям диоксида серы около 300-400 ppm и оксидов азота до 50-60 ppm при доле масла в составе смеси около 65 мас. %.

Изменение интенсивности светового потока, также приводит к изменению соотношений газообразных продуктов пиролиза. На рис. 9 представлены зависимости концентраций основных продуктов пиролиза от интенсивности светового нагрева.

С увеличением интенсивности нагрева производительность процесса газогенерации монотонно растет. Производство оксидов углерода и метана становится существенным при достижении интенсивности светового пучка на уровне 600 Вт/см². Соотношение горючих и негорючих частей газовой смеси остается приблизительно на одном уровне (рисунок 9 (в)).

Образование SO_2 с увеличением интенсивности нагрева незначительно снижается, по-видимому, вследствие падения парциальной концентрации кислорода в атмосфере камеры из-за его потребления процессами окисления углерода и вытеснения смесью образующихся газов. Выработка оксидов азота поддерживается на относительно низком уровне.

Оценка затрат энергии на пиролиз 1 кг топливной смеси представлена на рисунке 10 (а). Можно сделать вывод, что затраты энергии достаточно стабильны в широком диапазоне соотношения масла и торфа в смеси. В различные моменты времени по ходу процесса уровень затрат энергии меняется незначительно. Т.е. можно заключить о том,

что по истечении первой минуты процесса, он выходит на квазистационарный режим. При содержании масла в смеси свыше 70 мас. % происходит быстрый скачок затрат энергии на пиролиз, обусловленный резким снижением температуры процесса и, следовательно, замедлением роста массы пиролизных газов.

В целом однородный торф требует гораздо меньшего подогрева для начала окисления и, следовательно, для успешного пиролиза единицы массы. Однако смесь торфа и масла требует гораздо большей интенсивности нагрева для прохождения температурного порога начала пиролиза вследствие потерь тепла за счет испарения летучих компонентов масла. Требуемая интенсивность светового потока близка к уровню, необходимому для пиролиза каменного угля.

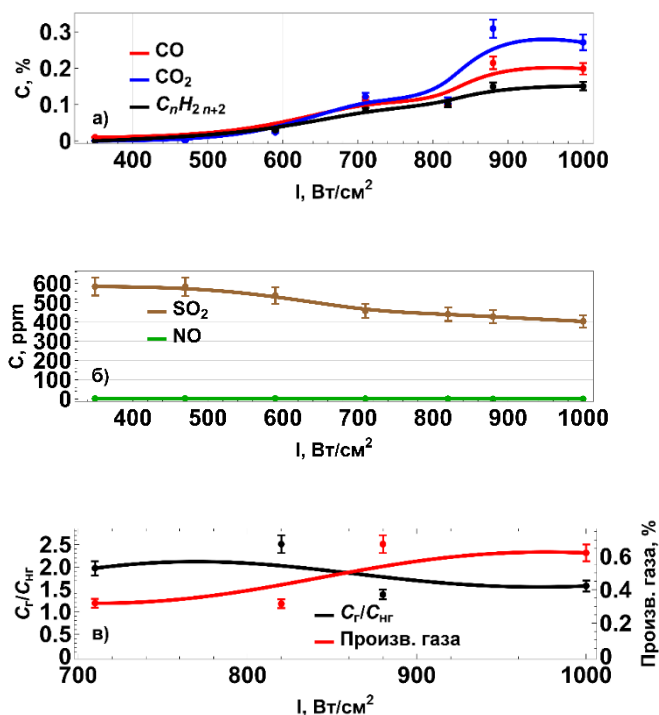


Рисунок 9 – Изменение концентрации компонентов газовой смеси в процессе пиролиза топлива на основе торфа с маслом при разных интенсивностях под действием сфокусированного света

Видно, что меньшая интенсивность стороннего нагрева приводит к более раннему доминированию потерь тепла над его притоком. Что обуславливает скачок затрат энергии на единицу массы топлива при меньших концентрациях масла. На рис. 10 (б) видно, что более высокая интенсивность светового потока (и, соответственно, высокая фактическая температура поверхности) позволяет сделать процесс более эффективным. При низких интенсивностях теплового потока, характерных для обычного сжигания торфа (около 50 Вт/см^2), пиролиз торфо-маслянных композиций становится слишком энергозатратным или практически невозможным даже при очень небольшом количестве масла в составе топливной смеси.

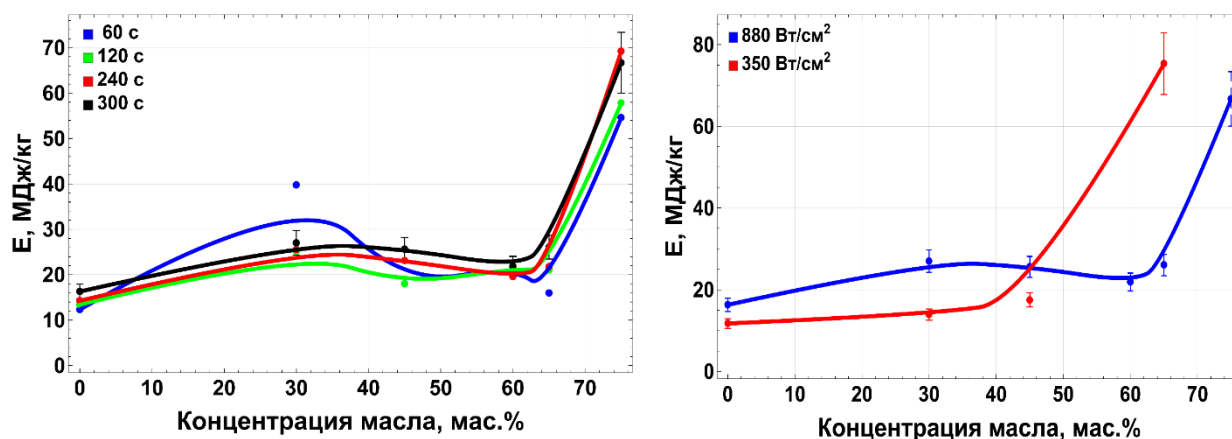


Рисунок 10 – Затраты энергии на пиролиз топливной смеси на основе торфа при разных концентрациях под действием сфокусированного света (а) и удельные затраты энергии на пиролиз топлива при различной интенсивности внешнего светового потока (б)

В заключении третьей главы представлены основные результаты и выводы.

В четвертой главе изучены особенности процесса пиролиза топливных смесей на основе бурого угля с добавлением масла. При анализе свойств компонентов смесевое топливо и готовых смесей использовались методы ТГА и бомбовой калориметрии. Из рис. 11 следует, что зависимость потери массы (ТГ) для топливных композиций лежит между кривыми для отдельных компонентов. Однако дифференциально сканирующая калориметрия (ДСК) показывает схожее положение пиков тепловыделения для смесевое топлива (относительно пика тепловыделения компонентов топлива). В то же время смесь бурого угля с маслом демонстрирует более крутой наклон кривой ТГ в области температур, где происходит наиболее эффективное разложение ($350\text{--}450^\circ\text{C}$).

Пики реакционной способности бурого угля и масла приходятся на температуры около 445°C и 426°C , соответственно. Топливная композиция с 40 мас. % масла имеет максимальное изменение веса при 401°C . Таким образом, эта температура является самым низким порогом преобразования для таких композиций. В рассматриваемом в работе случае пиролиза топливной смеси под действием сфокусированного светового потока средняя температура близка к $700\text{--}800^\circ\text{C}$ и даже выше. При этом все химические реакции и процессы испарения стартуют практически одновременно, начиная с момента включения нагрева (в течение нескольких секунд).

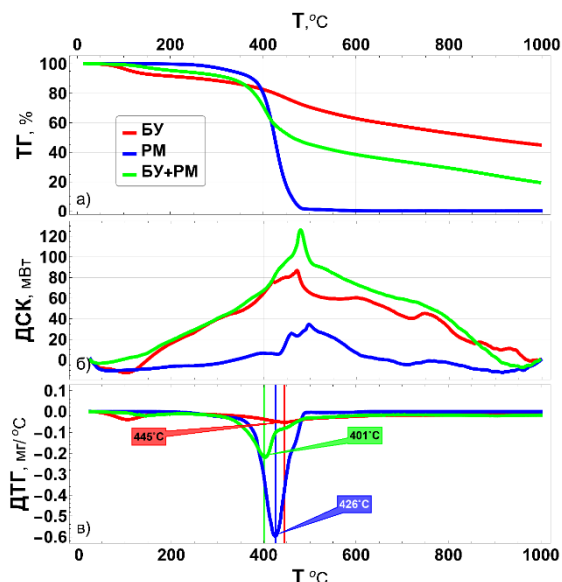


Рисунок 11 – Результаты ТГА исследования для бурого угля, масла и смеси (40 мас. % масла)

для эффективного разложения основных жирных кислот из состава масла. Горение такого топлива не может протекать без внешнего подогрева, поддерживающего температуру топлива выше 600 °С. При низкой интенсивности нагрева компоненты масла долго испаряются. При этом поддерживается умеренная температура на поверхности смеси до того момента, когда большая часть летучих компонентов масла испарится. Синергетический эффект одновременного окисления разных компонентов топлива в этом случае будет потерян.

Мощный внешний источник света, нагревающий топливо до температур около 550-600 °С за 2-3 с, таким образом, позволяет эффективно вовлекать экзотермические реакции в дальнейший разогрев топлива в ходе процесса пиролиза.

На рис. 12 представлены результаты калориметрического анализа для топливной смеси на основе бурого угля и масла (40 мас. %). Высшая теплотворная способность,

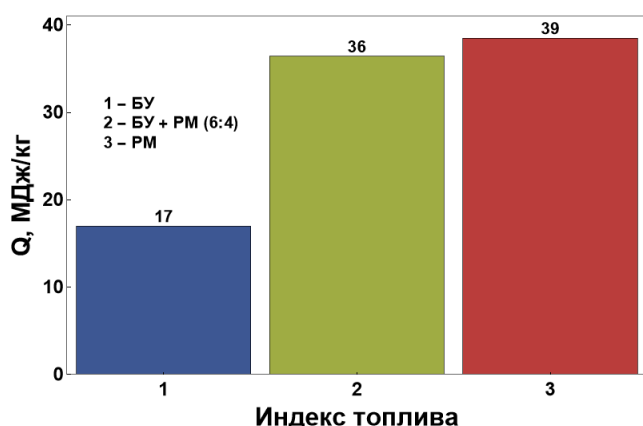


Рисунок 12 – Теплотворная способность чистых топлив и их смеси

Анализ теплоты, выделяющейся при пиролизе смеси (рис. 11 (б)) показывает, что при термическом разложении композитного топлива пики тепловыделения возникают, при более высоких температурах, чем для бурого угля или масла самих по себе. Видно, что максимум кривой ДСК для смеси приходится на температуру около 600 °С. Наличие небольшого спада на синей кривой около 450 °С отражает эффект испарения летучих из масла. Из вышеизложенного следует, что стабильное самоподдерживающееся воспламенение смеси, наполненной большим количеством масла, маловероятно (требуется очень интенсивный внешний подогрев). Это связано с тем, что из-за больших потерь тепла на испарение компонентов масла рост температуры топлива идет медленно, в результате чего температура с трудом достигает уровня, необходимого

полученная для чистого масла, составила ~39 МДж/кг. Все составы, содержащие значительное количество масла, также имели достаточно высокую теплоту сгорания. Однородный бурый уголь имеет более низкую удельную теплоту сгорания из-за присутствия влаги и негорючей минеральной части. Видно, что высокая теплотворная способность, полученная для композиционного топлива, заметно превышает оценки, полученные с использованием обычных аддитивных соотношений (для доли бурого угля ~0,6).

Калориметрический анализ также показывает, что высокотемпературное горение композиции обеспечивает очень высокую теплоту сгорания. Самоподдерживающееся горение такой смеси при более низких температурах (без внешнего подогрева) протекает преимущественно в форме тления, когда значительная часть летучих компонентов масла испаряется, не участвуя в экзотермических реакциях.

При возникновении внешнего нагрева происходит быстрое возрастание температуры поверхности образца топлива. При этом стартуют окислительные реакции, выделяющие тепло, что в совокупности с тепловым потоком от излучения света быстро разогревает смесь. В ходе процесса пиролиза смесей на основе бурого угля температуры достигают максимальных значений до 1450 °С. Зависимости температуры от времени протекания процесса пиролиза изображены на рисунке 13.

Температуры, которые достигаются в ходе нагрева от внешнего источника находятся в пределах 600 °С. Превышение данного температурного порога обусловлено тепловыми эффектами экзотермических реакций окисления. Ускорение данных реакций с ростом температуры (подчиняющееся закону Аррениуса) продолжается до тех пор, пока не будет достигнут баланс нагрева и оттока тепла за счет тепловых потерь. Увеличение доли масла помогает интенсифицировать процессы пиролиза и испарения летучих компонентов на начальных этапах нагрева. Эти процессы задают избыточные потери тепла на начальных этапах конверсии смесей с большим содержанием масла.

Нагрев бурого угля при старте процесса происходит гораздо быстрее, чем нагрев смесей, содержащих масло, вследствие меньших потерь тепла, уносимого продуктами пиролиза связанных летучих.

В результате проведенной серии экспериментов было выявлено, что в зависимости от доли масла в смеси, наблюдаются три различных режима нагрева топлива, что показано на рис. 13. Для первого режима нагрева характерен быстрый рост температуры смесевого топлива и последующий переход в стационарный режим с температурами около 1300-1400 °С. Данный режим наблюдается для чистого бурого угля и смесей, в которых доля масла не превышает 30 мас. %.

Для смесей, с содержанием масла от 35 до 40 мас. %, характерен более медленный рост температуры в ходе пиролиза, однако итоговые температуры достигают больших значений (1400-1450 °С).

Третий режим нагрева наблюдается для смесей, с концентрацией масла (45-60 мас. %). Для него свойственен продолжительный нагрев композиционного топлива после достижения 1000 °С и достижение максимальных температур около 1350 °С после 700-750 секунд нагрева. В данном случае выход на максимальные температуры происходит значительно плавнее, чем для смесей с меньшими концентрациями РМ.

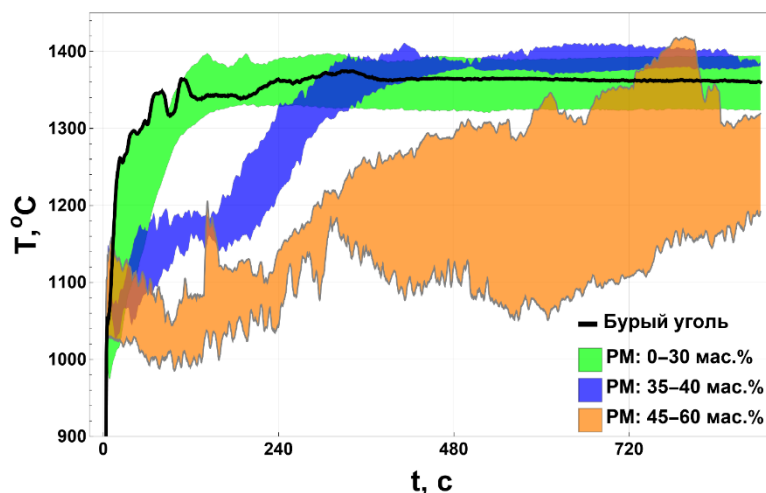


Рисунок 13 – Изменение температуры поверхности топливной смеси со временем в процессе пиролиза топливной смеси на основе бурого угля и масла (до 60 мас. %) под действием сфокусированного света

Замедление роста температур, на наш взгляд, вызвано ранее отмеченными потерями тепла вследствие увеличения концентрации летучих компонентов масла.

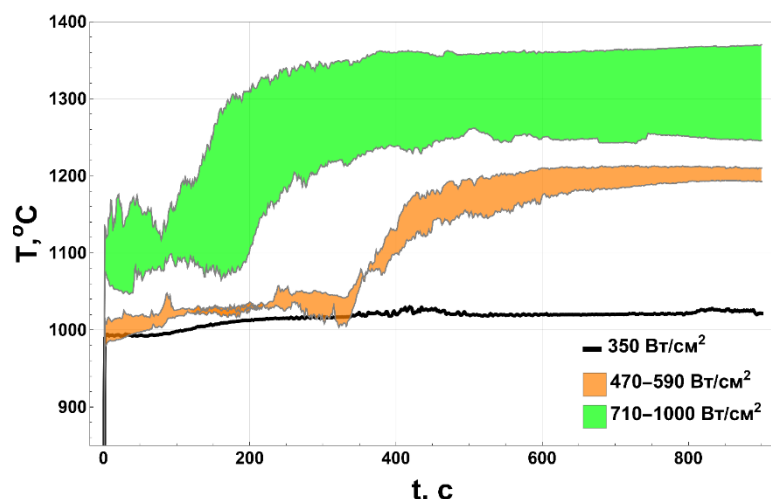


Рисунок 14 – Изменение температуры поверхности топливной смеси со временем в процессе пиролиза топливной смеси на основе бурого угля и масла под действием сфокусированного света

для вспышки горения, наблюдаемого при больших интенсивностях. Тепло в данном случае расходуется на испарение компонентов масла с поверхности твердого топлива и его недостаточно для запусков процессов окисления топлива.

С повышением интенсивности нагрева снижается дальнейшая длительность нагрева топливной смеси после достижения $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимальные температуры, достигаемые в ходе процесса пиролиза, находятся в пределах $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Время нагрева при этом уменьшается от 350 до 150 секунд.

Увеличение интенсивности до 1000 Вт/см^2 не дает сильного прироста производительности процесса. Температурный тренд выходит на пиковые температуры за меньший промежуток времени, однако значение пиковых температур сопоставимо с тем, что наблюдается для интенсивности $800\text{--}900\text{ Вт/см}^2$. Более быстрый выход на пиковые температуры обусловлен задействованием термических реакций окисления топлива.

Исследование пиролиза композиций на основе бурого угля (рисунок 15) показало,

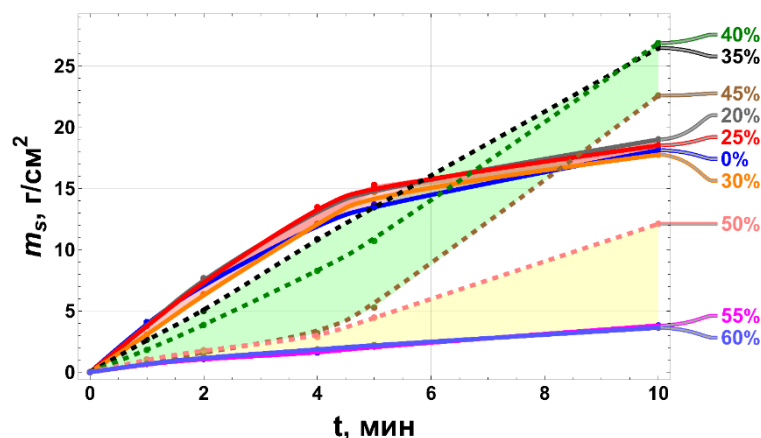


Рисунок 15 – Выход массы газовой смеси топлива со временем в процессе пиролиза топливной смеси на основе бурого угля и масла при разных концентрациях под действием сфокусированного света

При исследовании зависимости температуры пиролиза от интенсивности светового потока наблюдается зависимость, представленная на рисунке 14. Концентрация масла в составе смеси была равна 40 мас. %. Данная концентрация была выбрана потому, что такая смесь позволяет получать генераторный газ с максимальной долей горючих компонентов. Можно сделать вывод, что с увеличением интенсивности светового потока плавно увеличивается температура процесса. При интенсивности менее 350 Вт/см^2 нет начального скачка температуры, характерного

для вспышки горения, наблюдаемого при больших интенсивностях. Тепло в данном случае расходуется на испарение компонентов масла с поверхности твердого топлива и его недостаточно для запусков процессов окисления топлива.

Исследование пиролиза композиций на основе бурого угля (рисунок 15) показало, что процесс характеризуется более высокой общей производительностью в сравнении с тем, что наблюдалось для торфо-масляных смесей. Чистый бурый уголь может давать до 18 граммов газов на единицу площади освещаемой поверхности (после 5 мин нагрева), что в 3 раза выше, чем при пиролизе смесей на основе торфа.

Добавление масла к бурому углю несколько увеличивает производство газа. При этом составы с 35-45 мас. % масла допускают ква-

зилинейный рост массы образующихся газов во времени (после 5 мин нагрева). Поэтому максимальное образование оксидов углерода и метана составляет до 25 г на единицу площади облучаемого топлива. Общая выработка газов максимальна при доле масла около 40 мас. % и снижается при дальнейшем увеличении доли масла. Таким образом, оптимальное соотношение бурого угля и масла составляет 3:2. Область зеленого цвета на рис. 15 показывает диапазон концентраций масла, обеспечивающий достаточно эффективный пиролиз.

Максимальная производительность газогенерации при концентрациях масла 0-30 мас. % достигает 70 % от того, что дает смесь с содержанием масла 40 мас. %. Третий режим характерен для смесей с большим содержанием масла (выделен желтым цветом). Область желтого цвета показывает диапазон концентраций масла, в котором возможно только испарение летучих компонентов топлива.

На рисунке 16 изображена динамика роста массы газов в зависимости от интенсивности нагрева топлива. Стоит отметить, что зависимости преимущественно имеют линейный характер. Наиболее быстрый рост газогенерации наблюдается при нагреве наиболее высокой интенсивности. По истечении 10 минут нагрева топливо теряет с выходящими газами около 25 грамм/см². При понижении интенсивности до 590 Вт/см² производительность газогенерации падает в 1,5 раза вследствие понижения характерных температур процесса. При понижении интенсивности до 350 Вт/см² газогенерация падает еще в 4 раза. Потеря массы образца при таком режиме нагрева вызвана в основном испарением летучих компонентов масла. Таким образом, понижение эффективности ниже 600 Вт/см² не целесообразно.

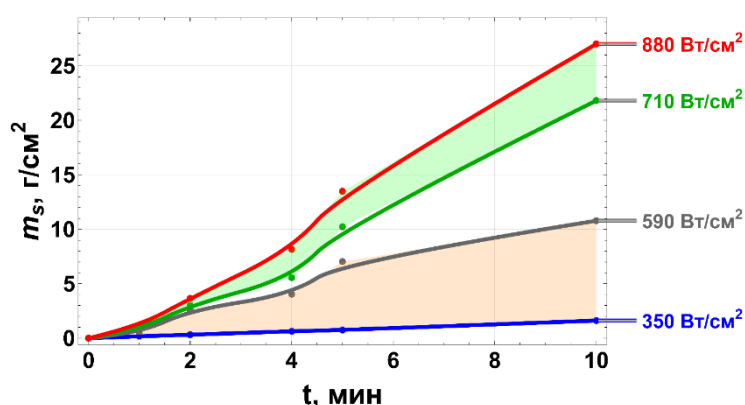


Рисунок 16 – Выход массы газовой смеси топлива со временем в процессе пиролиза топливной смеси на основе бурого угля и масла при разной интенсивности под действием сфокусированного света

В ходе проведения исследований по измерению концентраций различных газов, которые получаются в ходе процесса пиролиза топливных смесей с различным содержанием масла были получены зависимости, показанные на рисунке 17. Продуктами пиролиза с наивысшей концентрацией оказались такие газы, как CO₂, CO и CH₄. Газы CO и CO₂ образуются в основном из-за прямого окисления углерода, содержащегося в буром угле, а предельные углеводороды (метан и этан) имеют преимущественно пиролитическое происхождение. Для протекания процесса синтеза метана необходимо соблюдение двух условий (высокие температуры процесса и высокое давление), однако рассматриваемый процесс проходит при атмосферном давлении, что ведет к малой вероятности синтеза метана. Соотношение самого массового горючего газа CO и негорючего CO₂ находится на уровне 1:3, а генерация водорода достаточно мала из-за дефицита воды. При увеличении в смеси концентрации масла до 40 мас. %, соотношение CO и CO₂ достигает 1:2. Также начинается образование предельных углеводородов (в основном метана) и водорода в соотношении 9:1, что в совокупности с большим количеством CO позволяет получить генераторный газ с высокой теплотворной способностью.

Самым оптимальным составом топлива, с точки зрения теплотворной способности газовой смеси, является композиция с 40-45 мас. % масла.

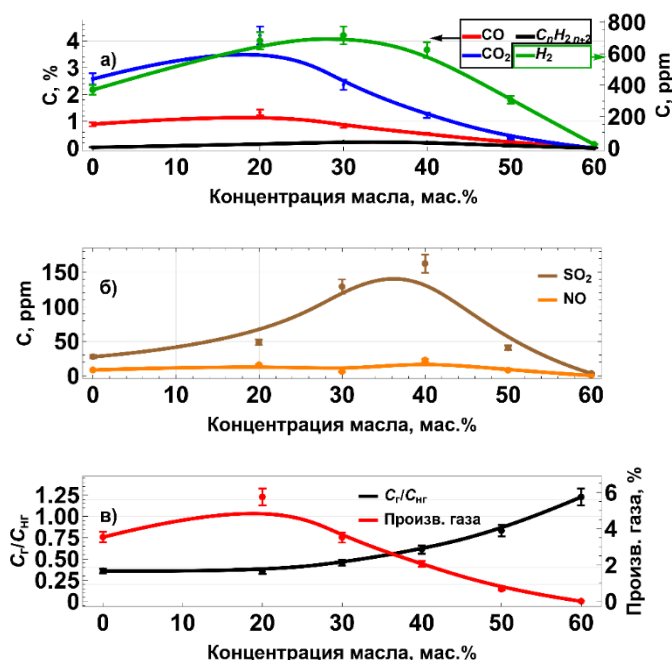


Рисунок 17 – Изменение концентрации компонентов газовой смеси в процессе пиролиза топлива на основе бурого угля с маслом при разных концентрациях под действием сфокусированного света

В момент, когда содержание масла в образце топлива превосходит 50 мас. %, производство всех газов начинает снижаться вследствие снижения характерных температур, достигаемых в ходе процесса пиролиза из-за снижения доли бурого угля.

На рисунке 17 (б) показано, что в связи с увеличением концентрации масла происходит небольшое увеличение концентрации NO. В составе полученной газовой смеси в большом количестве присутствуют оксиды серы. Локальный максимум которых достигается при концентрациях масла ~30-40 мас. %. Дальнейшее повышение концентрации масла в составе смеси приводит к снижению концентраций оксидов серы и азота. Снижение выработки вредных оксидов происходит в следствие снижения характерных температур процесса пиролиза.

На рис. 17 (в) отображены зависимости соотношения горючих и негорючих компонентов полученного генераторного газа, а также общей производительности процесса газогенерации от содержания масла в образце топливной смеси.

По результатам исследования можно сделать вывод, что соотношение горючих и негорючих компонентов газовой смеси увеличивается вместе с увеличением содержания масла в образце топливной смеси. Но при этом, снижается общее количество произведенного генераторного газа, в момент, когда содержание масла превышает 20 мас. %. Переход порога 50 мас. % содержания масла в составе топливной смеси влечет за собой резкое падение производства газовой смеси. Следовательно, дальнейшее увеличение концентрации РМ нецелесообразно. На рисунке 18 изображена зависимость общей газогенерации от интенсивности светового потока. По динамике газогенерации на рисунке 18 (а) можно сделать заключение, что производство большинства газов становится ощутимым в момент, когда интенсивность светового потока достигает значения близкого к 600 Вт/см². Однако, запуск генерации предельных углеводородов (метана) протекает при интенсивностях, превышающих 750 Вт/см².

С увеличением интенсивности плавно растут концентрации всех газов. Соотношение производства CO и CO₂ меняется в зависимости от интенсивности светового потока. При световом потоке с интенсивностью до 500 Вт/см² их соотношение находится приблизительно 1:1. Однако, при прохождении порога в 600 Вт/см² рост концентрации углекислого газа начинает превосходить генерацию оксида углерода и достигает соотношения 1:3. Образование предельных углеводородов начинается при интенсивности светового потока ~650 Вт/см² и начинает активно возрастать после 750 Вт/см².

Из рис. 18 (б) видно, что с увеличением интенсивности светового потока растут концентрации вредных примесей (NO_x , SO_2). Оксиды серы присутствуют в составе газовой смеси в минимальных количествах, а их образование стартует при прохождении порога 500 Вт/см^2 . Оксиды азота начинают образовываться при прохождении порога 750 Вт/см^2 .

Изменение интенсивности ведет за собой сильное изменение в соотношении компонентов горючей смеси. На рисунке 18 (в) отображены зависимости изменения соотношения горючих и негорючих компонентов в химическом составе генераторного газа. При увеличении интенсивности процесса пиролиза данное соотношение уменьшается из-за того, что при малых интенсивностях концентрации всех газов находятся на уровне, близком к нулю. При прохождении порога в

600 Вт/см^2 наиболее массовым продуктом пиролиза является CO_2 . Однако, суммарная доля монооксида углерода и предельных углеводородов дает значение, аналогичное генерации углекислого газа. В итоге, после прохождения порога в 600 Вт/см^2 соотношение горючих и негорючих газов находится на одном уровне.

На рисунке 19 (а) представлены затраты энергии от внешнего источника тепла на пиролиз смесей на основе бурого угля. По рисунку видно, что затраты энергии в диапазоне 0-30 мас. % масла достаточно схожи на всех временных отрезках. Скачок затрат при прохождении порога в 50 мас. % происходит из-за снижения характерных температур для составов с большим количеством масла и затрат большого количества энергии на испарение летучих компонентов смеси. Следовательно, использование смесей с содержанием масла выше 50 мас. % нецелесообразно. Энергия, необходимая для преобразования единицы массы оптимальной композиции топлива на основе бурого угля, составила около 9 МДж/кг. В то же время бурый уголь выделял довольно много тепла, что способствовало эффективной и относительно быстрой конверсии смеси.

На рис. 19 (б) видно, что энергия, затрачиваемая на пиролиз килограмма светового топлива при интенсивности светового потока 350 Вт/см^2 , достигает приблизительно одного и того же значения вне зависимости от концентрации масла. Исходя из результатов, представленных в предыдущих разделах, стоит отметить, что пиролиз при такой интенсивности нагрева малоэффективен. Также, стоит отметить отсутствие скачка, характерного для интенсивности 880 Вт/см^2 . Снижение затрат энергии при пиролизе топливной смеси на интенсивности 880 Вт/см^2 происходит из-за максимальных пиковых температур процесса. При достижении более высоких температур начинают влиять тепловые эффекты химических реакций.

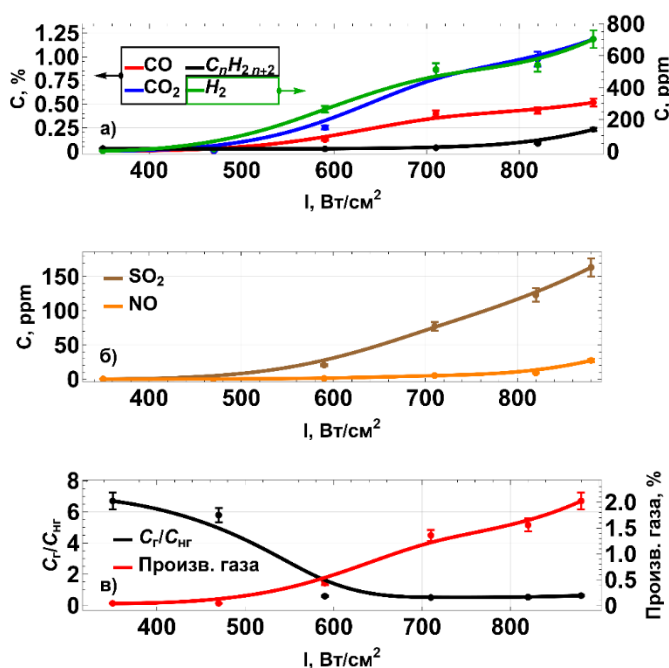


Рисунок 18 – Изменение концентрации компонентов газовой смеси в процессе пиролиза топлива на основе бурого угля с маслом при разных интенсивностях под действием сфокусированного света

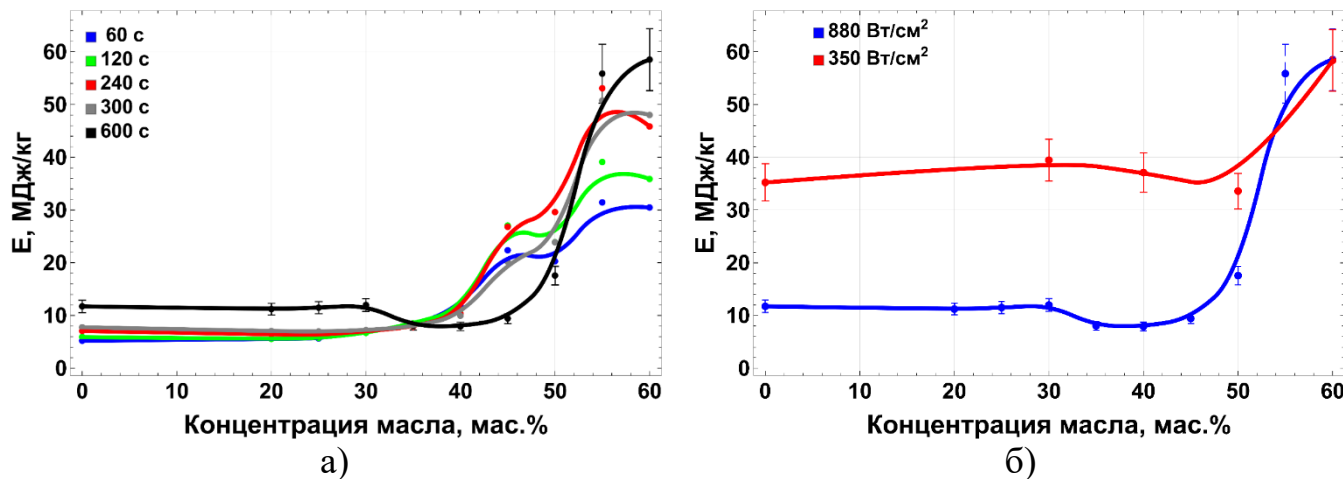


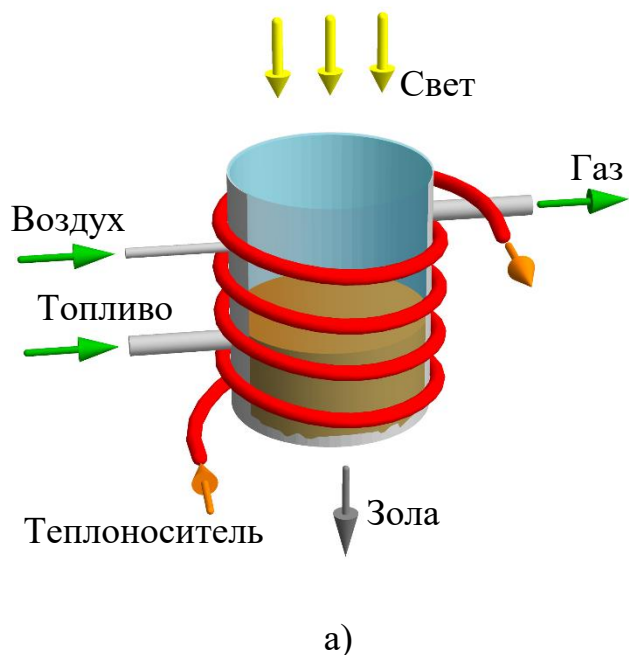
Рисунок 19 – Затраты энергии на пиролиз топливной смеси на основе бурого угля при разных концентрациях под действием сфокусированного света (а) и энергия, затрачиваемая на единицу массы образующихся газов к определенному моменту процесса конверсии. Концентрация масла в составе смеси 40 мас. % (б)

В заключении четвертой главы представлены основные результаты и выводы. Также даны рекомендации по использованию оптимального состава и минимальной интенсивности светового нагрева для достижения наиболее эффективного процесса пиролиза.

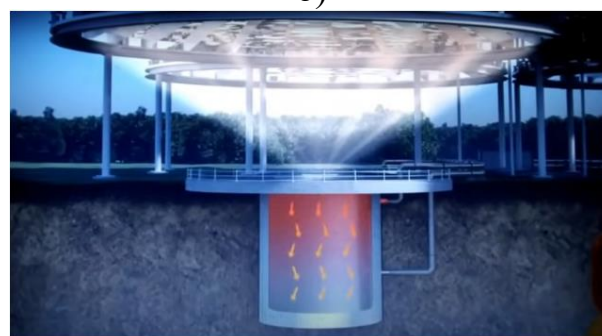
В пятой главе приведена оценка потенциала практического применения представленных результатов. Представлен возможный дизайн промышленной установки, функционирующей в рамках рассматриваемого подхода. На рисунке 20 (а) представлен предлагаемый дизайн камеры реактора для пиролиза композиционного топлива под действием сфокусированного потока солнечного света, оборудованной витым теплообменником и каналами подачи/отвода топлива и генераторного газа. На рисунке 20 (б, в), представлен общий вид солнечного концентратора, концепция которого была предложена китайскими и швейцарскими инженерами, пригодного для термохимической переработки твердого топлива. Данное решение отлично подходит для реализации предложенного в работе подхода.

При подсчете экономического эффекта от использования предлагаемых топливных смесей учитывалась стоимость различных топлив, а также энергия, которую можно получить при сжигании 1 тонны такого топлива (без учета капитальных затрат на создание инфраструктуры по использованию такого топлива). Наименьшие финансовые затраты на производство 1 МДж тепла получилось у чистого бурого угля. Наибольшие затраты достигаются при использовании растительного масла из-за его высокой стоимости. При сжигании смесей на основе торфа и масла, каждый мегаджоуль тепла стоит ~1,24 рубля. При использовании отработанного моторного масла цена снижается до 0,39 руб/МДж. Столь высокие затраты обусловлены высоким содержанием масла в составе смеси. При использовании смеси на основе бурого угля и растительного масла затраты достигают 0,81 руб/МДж, что уже сопоставимо с затратами на теплогенерацию при использовании в качестве топлива антрацита или мазута. При использовании в составе смеси отработанных моторных масел стоимость мегаджоуля падает до 0,31 рублей. Однако, с учетом того, что масло-буроугольная смесь состоит на 40 % из отходов или возобновляемого компонента, смесевые топлива достаточно быстро превзойдут антрациты и мазут в долгосрочной перспективе вследствие истощения легко доступных

залежей антрацитов и нефти. Кроме того, учитывая географию распространения залежей бурого угля, при использовании смесевых топлив можно ожидать существенной экономии на транспортировке топлива потребителю в сравнении с каменными углями. Потенциальный рост цен на ископаемые топлива вместе с расширением географии выращивания также предполагают снижение цен на масло со временем (что подтверждается историей биржевых котировок).



б)



в)

Рисунок 20 – Внешний вид модели теплообменника (а) и проекты солнечной электростанции в Китае (б) и Швейцарии (в)

Таблица 1 – Цены на топливо и стоимость МДж энергии

Топливо	Цена, р/т	Удельная теплота сгорания, МДж/т	Руб./МДж
Бурый уголь	2000	17000	0,11
Торф	1500	12000	0,13
Природный газ	—	—	0,15
Каменный уголь	6000	24000	0,25
Смесь (БУ-60 мас. %, ОММ-40 мас. %)	8800	27800	0,31
Смесь (Торф-35 мас. %, ОММ-65 мас. %)	12875	32800	0,39
Отработанное машинное масло	19000	44000	0,43
Антрацит	19000	30000	0,63
Мазут	28500	40000	0,71
Смесь (БУ-60 мас. %, РМ-40 мас. %)	29200	36000	0,81
Смесь (Торф-35 мас. %, РМ-65 мас. %)	46025	37000	1,24
Рапсовое масло	70000	39000	1,79

Технологии использования смесевых топлив с применением солнечного нагрева потенциально открывают путь к существенной экономии ископаемого топлива (более, чем двукратной) за счет использования отходов или возобновляемых компонентов. Кроме того, часть вырабатываемой при пиролизе смеси энергии сразу получается в пригодной к длительному хранению форме (генераторный газ), что выгодно отличает предложенный подход от современных технологий возобновляемой энергетики.

В заключении пятой главы представлены основные результаты и выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение некогерентных источников света для энергетической накачки процесса пиролиза смесевых топлив, приготовленных из торфа или бурого угля с добавлением масла, позволяет запустить и поддерживать процесс пиролиза при использовании тепловых потоков с интенсивностью около $300-400 \text{ Вт/см}^2$, что значительно превосходит тепловые потоки, достигаемые при сжигании топлива в печи.

2. Установлены основные параметры (удельные затраты энергии, характерные температуры, производительность газогенерации и состав газовой смеси) процесса пиролиза для смесевых топлив на основе торфа или бурого угля с добавлением масла.

3. Для эффективного термического разложения жирных кислот, содержащихся в смесевых топливах на основе торфа и бурого угля с добавлением 40-65 мас. % масла, необходимо в течение нескольких секунд довести температуру топлива до величин, превышающих 600°C за короткий промежуток времени.

4. Смеси, состоящие из торфа и масла (65 мас. %), а также смеси, состоящие из бурого угля и масла (40 мас. %), ходе пиролиза позволяют максимально задействовать тепловой эффект окисления топлива и получить генераторный газ, более чем на половину состоящий из горючих компонентов.

5. Смеси, состоящие из торфа и масла (65 мас. %), а также смеси, состоящие из бурого угля и масла (40 мас. %), имеют удельную теплоту сгорания свыше 35 МДж/кг , заметно превышающую сумму теплот сгорания компонентов смеси.

6. Для пиролиза одного килограмма смеси торфа и масла (65 мас. %) требуется подвести $\sim 20 \text{ МДж}$ энергии светового излучения. Аналогично, для пиролиза одного килограмма смеси бурого угля и масла (40 мас. %) необходимо подвести $\sim 10 \text{ МДж}$ энергии.

Основные публикации по теме диссертации

В изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus или Web of Science

1. Belonogov, M. V. Comparative analysis of partially renewable composite fuels based on peat, lignite and plant oil / **M. V. Belonogov**, R. I. Egorov, D. O. Glushkov // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – P. 1–14.
2. Belonogov, M. V. Optimal allothermal conversion of the quasi-renewable fuel composition / **M. V. Belonogov**, R. I. Egorov // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2023. – Vol. 1. – P. 1–8.
3. Taburchinov, R. I. Effect of the addition of petrochemicals onto the atomization and ignition of the coal-water slurry prepared from the wastes / R. I. Taburchinov, **M. V. Belonogov**, R. I. Egorov // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10. – P. 1–11.
4. Egorov, R. I. High-temperature conversion of lignite and rapeseed oil mixtures / R. I. Egorov, **M. V. Belonogov** // Ugol. – 2023. – Vol. 1. – P. 56–61.

В рецензируемых российских научных изданиях

5. Белоногов М. В. Конверсия топливных композиций, состоящих из торфа и рапсового масла, в генераторный газ / **М. В. Белоногов**, Р. И. Егоров, А. С. Зайцев // Химия твердого топлива. – 2019. – № 1. – С. 54–60.