

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи



Боголюбова Ирина Владимировна

**Разработка технологии совместной термической переработки
некондиционных угольных материалов и обезвоженного
избыточного активного ила**

2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва» на кафедре химической технологии твердого топлива

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент кафедры химической технологии твердого топлива,
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачёва»
Ушаков Андрей Геннадьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник, федеральный
исследовательский центр угля и углехимии Сибирского
отделения Российской академии наук
Адуев Борис Петрович

кандидат химических наук,
доцент, заместитель директора по науке, заведующий
лабораторией «Химия углеводов»,
институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева
Российской академии наук
Куликов Альберт Борисович

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный университет нефти и газа
имени И.М. Губкина»

Защита состоится «10» сентября 2026 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета РХТУ 2.6.02 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева». (125047, г. Москва, Миусская пл., 9) в конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», а также на официальном сайте: https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/

Автореферат разослан «___» ___ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета РХТУ.2.6.02
доктор химических наук, профессор

Козловский Р.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В рамках технологического процесса биохимической очистки сточных вод ежегодно образуется около 123 млн м³ ила влажностью 98 % [35, с.5]. Учитывая, что илы, образующиеся практически во всех крупных и средних городах, загрязнены тяжёлыми металлами, проблема утилизации отходов в таких количествах по экобезопасной технологии приобретает первостепенное значение. В России как удобрение используется 1–6 %, перерабатывается не более 3 %, основная масса ила хранится в илонакопителях или на свалках промотходов. За рубежом в качестве удобрения используется в среднем 32,4 % осадка сточных вод. Так, в Люксембурге их используется 90 %, в Германии – 30 %, а в Бельгии – 10 % .

На сооружениях крупных городов России с населением более миллиона человек количество осадка может колебаться от 6000 до 10000 м³ в сутки. Утилизация такого количества «сырого» осадка представляет достаточно сложную технологическую и экологическую проблему.

Рассматриваемые технологии обработки осадков сточных вод направлены в основном на максимальное уменьшение их объёмов для более удобного транспортирования и утилизации.

При этом содержание органического углерода в ИАИ может достигать более 60 %, что свидетельствует о его высоком энергетическом потенциале с возможностью получения топлива для использования в котельных и топках промышленного назначения.

Использование ресурсов биомассы, являющейся эффективным возобновляемым источником энергии, для создания топливных гранул на основе угольной пыли представляется перспективным решением ввиду большого разнообразия потенциального сырья, а именно:

- 1) избыточный активный ил, образующийся на городских станциях очистки сточных вод, подвергаемый процессу обезвоживания;
- 2) мелкодисперсные некондиционные материалы, образующиеся в технологическом процессе предприятий переработки угля.

Термическая переработка формованной смеси угольных отходов и обезвоженного избыточного активного ила (ОИАИ) приводит к получению ценного газообразного топлива (CH_4 , H_2). Несмотря на проводимую большую исследовательскую работу в данном направлении, многие сложно композиционные отходы ещё недостаточно глубоко изучены и для них не разработаны технологические решения по использованию энергетического потенциала газообразных продуктов процесса пиролиза.

При этом становятся возможными изучение физико-химических свойств производственных побочных продуктов и промышленных отходов, разработка новых путей их утилизации, выдача рекомендаций по выделению основного вещества, а также компонентов для их последующего вторичного применения.

Степень разработанности темы

Значительный вклад в развитие научных основ процессов термической переработки твердых углеродсодержащих веществ с получением пиролизного газа внесли следующие ученые: Н.С. Грязнов, П.С. Маковецкий, В.Г. Липович, Г.Н. Макаров, Г.Д. Харлампович, С.Д. Федосеев, С.Д. Чернышов, С.Г. Аронов, Н.Н. Богданов, З.Р. Исмагилов, Ю. Я. Филоненко, А.А. Кауфман, Е.И. Казаков, А.А. Агроскин. В результате их исследований сформулированы общие представления о химизме и практике применения пиролиза углеродистых тел, но конкретные процессы, в частности, связанные с одновременной утилизацией отходов мелкодисперсных материалов и ОИАИ, требуют изучения и рекомендаций по ее технологии.

Цель работы заключается в разработке технологии совместной термической переработки обезвоженного избыточного активного ила (ОИАИ) и некондиционных угольных материалов.

На основании поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Обосновать использование ОИАИ в качестве связующего вещества для получения топливных гранул, подвергаемых термической переработке;
2. Определить наилучшие технологические параметры процесса пиролиза

топливных гранул смеси ОИАИ / некондиционные углеродсодержащие материалы, позволяющие получить наибольший тепловой эффект;

3. Определить температурные границы процесса пиролиза топливных гранул, включающих ОИАИ в качестве связующего вещества;

4. Получить математическое описание влияния основных действующих факторов процесса термической переработки топливных гранул на основе ОИАИ на содержание смеси $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ об.% в пиролизном газе.

Объект исследования:

- отходы предприятий переработки угля, в частности мелкодисперсная угольная пыль;

- органические отходы, в частности ОИАИ городских станций очистки воды.

Предмет исследования:

- закономерности влияния состава топливных гранул на содержание $\text{CH}_4 + \text{H}_2$, об.% в пиролизном газе;

- закономерности влияния основных факторов процесса пиролиза топливных гранул на содержание $\text{CH}_4 + \text{H}_2$, об.% в пиролизном газе.

Научная новизна работы

1. Впервые показано, что использование обезвоженного избыточного активного ила в качестве связующего вещества (от 20 до 40) мас.% совместно с некондиционными углеродсодержащими продуктами позволяет получить топливные гранулы с достаточными эксплуатационными характеристиками, пригодные к термической переработке методом пиролиза.

2. Впервые показано и научно обосновано, что верхней температурной границей процесса пиролиза гранул, включающих ОИАИ в качестве связующего вещества, является 600 °С, после чего изменение массы не превышает (5-7) мас.%.

3. Впервые определены наилучшие технологические параметры процесса пиролиза топливных гранул смеси ОИАИ / некондиционные углеродсодержащие материалы, позволяющие получить наибольший тепловой эффект сгорания продуктов пиролиза: границы массовых долей компонентов топливных гранул, температурный интервал и длительность проведения процесса пиролиза.

4. Впервые представлено математическое описание влияния основных действующих факторов процесса термической переработки топливных гранул на основе ОИАИ на содержание смеси $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ об.% в пиролизном газе.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в научном обосновании разработанной технологии, которая позволяет перерабатывать некондиционные углеродсодержащие материалы и ОИАИ с получением пиролизного газа с высокой теплотворной способностью.

На основании изучения взаимодействия компонентов представлено обоснование влияния количества ОИАИ в топливных гранулах на их прочность и состав выделяемого газа.

Предложено математическое описание влияния основных действующих факторов процесса термической переработки топливных гранул.

Практическая значимость

Проведенные исследования показали, что технология переработки отходов может найти применение на предприятиях, где образуются некондиционные углеродсодержащие материалы, а также ОИАИ, что будет способствовать решению проблемы утилизации отходов.

Получаемые топливные гранулы, подвергаемые пиролизу с получением газовой смеси $\text{CH}_4 + \text{H}_2$, могут быть рекомендованы в качестве альтернативного источника топлива для предприятий в технологических процессах использования пиролизных печей.

Опыт переработки топливных гранул, состоящих из некондиционных углеродсодержащих материалов и ОИАИ, может быть использован на предприятиях – источниках образования данного сырья и реализующих технологии по его переработке с получением высококалорийного газа.

Разработанный программно-алгоритмический комплекс (Свидетельство о регистрации программы RU 2023615118 от 10.03.2023 г.) может быть использован на предприятиях реального сектора экономики, специализирующихся на схожих термических процессах для прогнозирования содержания состава смеси $\text{CH}_4 + \text{H}_2$.

Методология и методы исследования

Методологической основой кандидатской диссертации является системный подход к разработке и оптимизации технологии совместной переработки некондиционных угольных материалов и обезвоженного избыточного активного ила.

В работе использованы экспериментальные и теоретические методы исследований исходного сырья и полученных продуктов, которые включают гранулометрический, а также химический и физико-химический анализ: термогравиметрический, хроматографический, калориметрический, атомно-абсорбционный.

В работе использовалось оборудование Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Содержание ОИАИ в качестве связующего вещества не менее 20 мас.% и не более 40 мас.% в смеси с некондиционными углеродсодержащими материалами делает возможным формирование топливных гранул, подвергаемых термической переработке с получением высококалорийного пиролизного газа.

2. Верхней температурной границей процесса пиролиза топливных гранул на основе ОИАИ и некондиционных углеродсодержащих материалов является 600 °С, что подтверждается данными термогравиметрического анализа.

3. Впервые определены основные граничные характеристики процесса термической переработки топливных гранул состава ОИАИ: некондиционные углеродсодержащие материалы (массовые доли компонентов топливных гранул, длительность и температурные границы переработки их методом пиролиза), при которых возможно получение пиролизного газа с наибольшим тепловым эффектом.

4. Математическое описание влияния основных действующих факторов термической переработки некондиционных углеродсодержащих материалов и ОИАИ на содержание в пиролизном газе $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ позволяет адекватно оценить реальный выход этих компонентов в пиролизном газе.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Результаты, выносимые на защиту, относятся к пункту 8 (разработка новых процессов переработки органических и минеральных веществ твердых горючих ископаемых с целью получения продуктов топливного и нетопливного назначения) паспорта научной специальности 2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ.

Обоснованность и достоверность научных результатов обеспечена

научно и методически обоснованной постановкой задач по выбору стадийности переработки угольных отходов, хорошей воспроизводимостью экспериментов при идентичных начальных условиях; использованием статистических методов обработки экспериментальных данных.

Точность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается достоверностью полученных данных, определяется и обосновывается комплексным подходом к получению и анализу результатов, согласованностью экспериментальных данных, полученных с помощью различных методов анализа.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследований, выборе объектов и методов исследований, систематизации и интерпретации полученных результатов, формулировании научных положений и выводов, разработке математической модели.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, в том числе на: Всероссийской научно-практической конференции «Теоретические и практические аспекты функциональной экологии» (г. Пущино, 2016 г.); I Международном научном форуме молодых ученых «Наука будущего – наука молодых» (г. Севастополь, 2015 г.); Инновационных конвентах «Кузбасс: образование, наука, инновации. Молодежный вклад в развитие НОЦ «Кузбасс» (г. Кемерово, 2019 и 2023 гг.); 5th International Innovate Mining Symposium, IIMS 2020 (Kemerovo, 2020); XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая» (г. Кемерово, 2021 г.)

Практическая часть диссертационной работы является основой проекта, занявшего первое место во Всероссийском конкурсе «Энергия знания» (2015 г.); получен грант по программе «У.М.Н.И.К.-2014».

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 12 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных научного цитирования Scopus и Springer. Получено свидетельство о регистрации компьютерной программы RU 2023615118 от 10.03.2023 г.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы. Общий объем диссертации составляет 163 страницы, содержит 45 рисунков, 56 таблиц и 3 приложения. Список литературы состоит из 128 наименований.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность всем сотрудникам кафедры «Химическая технология твердого топлива» КузГТУ за проявленное внимание и ценные практические советы при выполнении настоящей работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, научная новизна и практическая ценность проводимых исследований.

В первой главе рассмотрены современные тенденции в переработке мелкодисперсных некондиционных угольных материалов и органических отходов городских очистных сооружений, в частности ОИАИ. Подробно проанализированы существующие технологические решения по использованию органических материалов в качестве связующего вещества для создания гранулированного топлива, а также возможность его термической переработки для получения высококалорийных газообразных энергоносителей методом пиролиза. На основании результатов анализа установлена возможность использования ОИАИ для производства гранулированного топлива на основе мелкодисперсных

некондиционных угольных материалов.

Проведенный анализ теоретических исследований показал, что на процессы получения гранулированного топлива, а также его дальнейшую переработку методом пиролиза оказывают существенное влияние такие технологические параметры как соотношение наполнитель/связующее, температурный режим и длительность процесса, а также выход летучих веществ из исходного сырья.

Однако, вопросы комплексных исследований зависимости выхода целевых продуктов от вышеуказанных факторов недостаточно изучены. Такого рода процессы являются предметом исследования настоящей работы.

Во второй главе представлен план экспериментов, характеристики объектов исследования; описаны разработанные установки и методики для проведения исследований по пиролизу топливных гранул.

Дальнейшее получение топливных гранул состоит из следующих этапов:

- 1) приготовление исходной смеси с заданными соотношениями наполнитель/связующее;
- 2) формование топливных гранул в барабанном грануляторе;
- 3) сушка гранул как в естественных условиях, так и при температуре $105 \pm 5^\circ\text{C}$ в сушильном шкафу.

Для формования топливных гранул были использованы некондиционные угольные материалы со связующим веществом. В разной пропорции смешивали два вида отходов, далее помещали в барабанный гранулятор. Барабанный гранулятор вращался в течение (30-60) мин. Далее сформованные топливные гранулы подвергались сушке. Основные характеристики барабанного гранулятора представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики барабанного гранулятора, выбранные для проведения процесса окатывания смеси

Скорость вращения, об/мин	Материал	Время вращения, мин	Угол наклона, градусы
50±2	Нержавеющая сталь	от 30 до 60	2-5

На рисунке 1 представлен внешний вид лабораторной установки пиролиза.

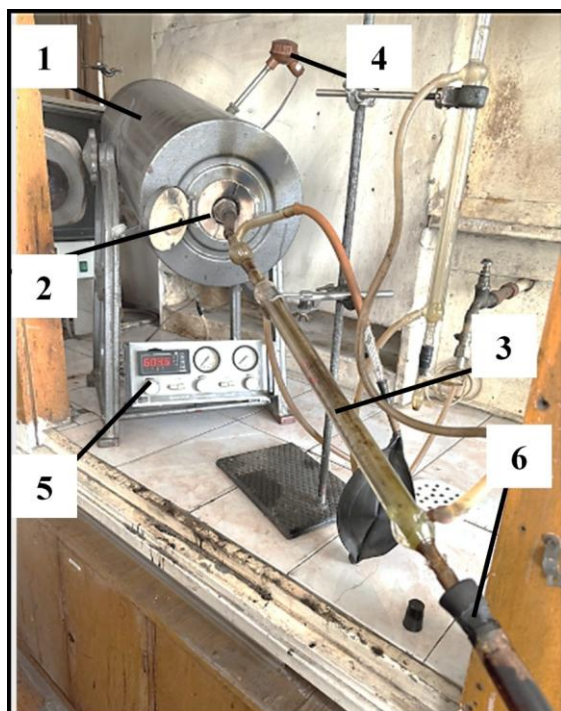


Рисунок 1 – Внешний вид лабораторной установки пиролиза:
1 – трубчатая печь; 2 – реактор-пиролизер; 3 – ёмкость для сбора пирогаза; 4 – датчик температуры; 5 – блок управления; 6 – приёмник для сбора сконденсированных продуктов

Основные узлы экспериментальной установки: трубчатая печь, реактор-пиролизер, система охлаждения пиролизного газа. Пиролизная печь развивает температуру до 1100 °С.

В третьей главе приведено описание экспериментов и их анализ.

Для формования топливных гранул был выбран диапазон от 20 до 50 мас.% связующего. По экспериментальным данным технического и элементного анализа угольной пыли, полученной при переработке шихты (таблица 2), все образцы угольной пыли имеют близкие значения технического и элементного анализа, таким образом для дальнейших исследований был выбран образец № 3 с наибольшим выходом летучих веществ, а также образец № 1 с наименьшим выходом летучих веществ.

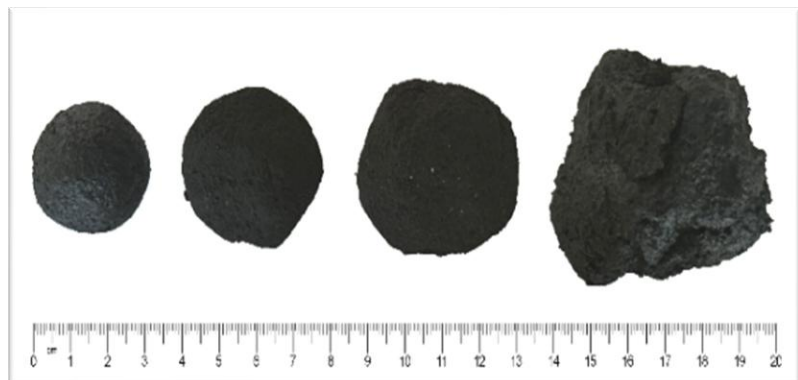
Внешний вид топливных гранул, полученных путем смешения угольных отходов и связующего вещества, представлен на рисунке 2.

Таблица 2 – Технический и элементный анализ некондиционных углеродных материалов

Шахты/Фабрики	Марка	%	Влажность, мас.%	Зольность, мас.%	V^{daf} , мас.%	Элементный состав, мас.%					
			Сухое состояние								
			W_t^r	A^d	V^{daf}	C	H	N	S	O	
<i>Технический и элементный анализ угольной пыли при переработке шихты</i>											
Образец №1	Антоновская	ГЖ	10	8,81± 0,82	8,42± 0,22	27,80± 0,78	85,13± 0,85	5,73± 0,06	1,52± 0,02	0,35± 0,02	6,12± 0,06
	Тихова	Ж	15								
	Таллиннская	ГЖ	10								
	Камышанский	ГЖО	10								
	Краснокаменская	К	30								
	Березовская	ЖКО	5								
	Березовская	КС	20								
Образец №2	Антоновская	ГЖ	35	10,13± 1,10	9,72± 0,22	29,40± 0,84	87,24± 0,87	6,13± 0,06	1,34± 0,01	0,35± 0,02	5,13± 0,05
	Талдинская	ГЖ	15								
	Березовская	ЖКО	3								
	Березовская	ОС	7								
	Березовская	К	10								
	Краснокаменская	К	10								
	Краснокаменская	КО	20								
Образец №3	Антоновская	ГЖ	35	7,52± 0,61	8,91± 0,22	30,21± 0,86	89,12± 0,89	4,31± 0,04	1,22± 0,01	0,31± 0,02	5,21± 0,05
	Березовская	К	10								
	Талдинская	ГЖ	15								
	Краснокаменская	К	10								
	Березовская	ОС	10								
	Краснокаменская	КО	20								



а



б

Рисунок 2 – Получаемые топливные гранулы: а – внешний вид, б – варьирование размера гранул в процессе формования смеси

При этом с увеличением содержания ОИАИ в топливных гранулах уменьшается количество углерода, что приводит к снижению энергетического потенциала получаемого топлива.

Одной из важнейших характеристик, определяющей возможность дальнейшего использования гранул, является прочность на истирание (таблица 5).

Увеличение количества угольной пыли в смеси способствует образованию более гладкой поверхности гранулы, однако уменьшает средний диаметр гранул, уменьшение диаметра гранулы не оказывает дальнейшего влияния на термический процесс.

Таблица 5 – Характеристики топливных гранул с разным количеством ОИАИ

Наименование некондиционного углеродного материала	Количество угольной пыли	Количество ОИАИ	Истираемость	Количество загруженных гранул	Количество оставшихся целых
	п, мас. %	п, мас. %		шт.	шт.
Угольная пыль от переработки шихты. Образец №1 (таблица 2)	80	20	82,60±0,20	10	8
	75	25	85,90±0,20	10	9
	70	30	89,20±0,20	10	9
	65	35	79,60±0,34	10	7
	60	40	75,40±0,88	10	6
Угольная пыль от переработки шихты. Образец №3 (таблица 2)	80	20	81,10±0,28	10	8
	75	25	85,20±0,20	10	9
	70	30	89,30±0,62	10	9
	65	35	80,40±0,44	10	7
	60	40	75,10±0,20	10	6

При использовании количества связующего вещества в диапазоне (20-30) об.% обеспечивается достаточная прочность при истирании. В смеси с 40 мас.% связующего образуются менее прочные гранулы из-за неравномерной поверхности.

Процесс пиролиза полученных топливных гранул осуществляли при температуре (100-850) °С. Газообразные компоненты, выделяющиеся в результате пиролиза, включают в себя широкий спектр веществ: CO₂, CO, CH₄, H₂, C_nH_m.

На рисунке 3 приведен усредненный состав газа, полученного в процессе пиролиза с содержанием ОИАИ 20 мас.% при разной температуре.

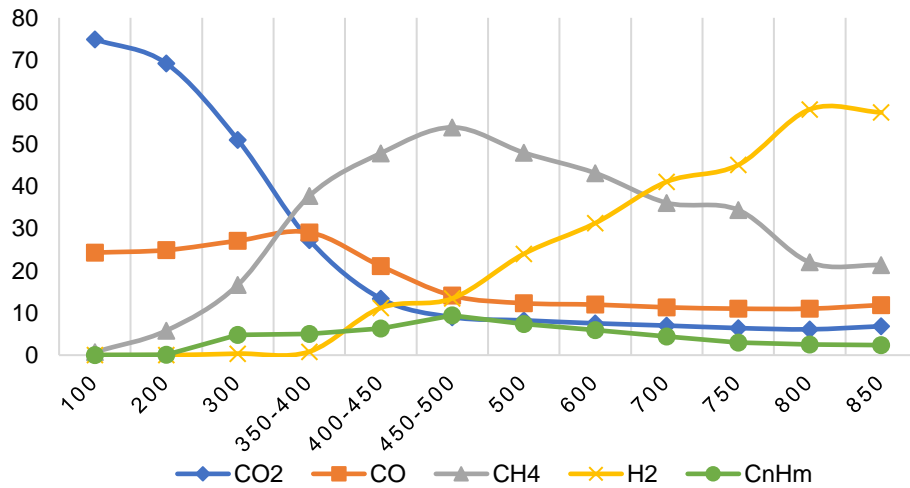


Рисунок 3 – Выход компонентов газа при пиролизе топливных гранул со связующим веществом – 20 мас.%

По данным рисунка 3 видно, что основными компонентами выделяемого газа, оказывающими влияние на калорийность, являются CH₄ и H₂, максимальная концентрация CH₄ и H₂ была достигнута при температуре (450-600) °C.

По результатам исследований было установлено, что при увеличении количества ОИАИ, в пирогазе уменьшается концентрация CH₄ и H₂. Связано это с тем, что выход CH₄ и H₂ из угольных отходов выше, чем из ОИАИ.

Графическая зависимость влияния T, °C на содержание CH₄ и H₂ в газе, полученном в процессе пиролиза в зависимости от содержания ОИАИ, представлена на рисунке 4.

Сводная таблица суммарного содержания (CH₄ и H₂) об.%, полученного в процессе пиролиза топливных гранул при разной температуре и разном количестве связующего вещества приведена в таблице 6.

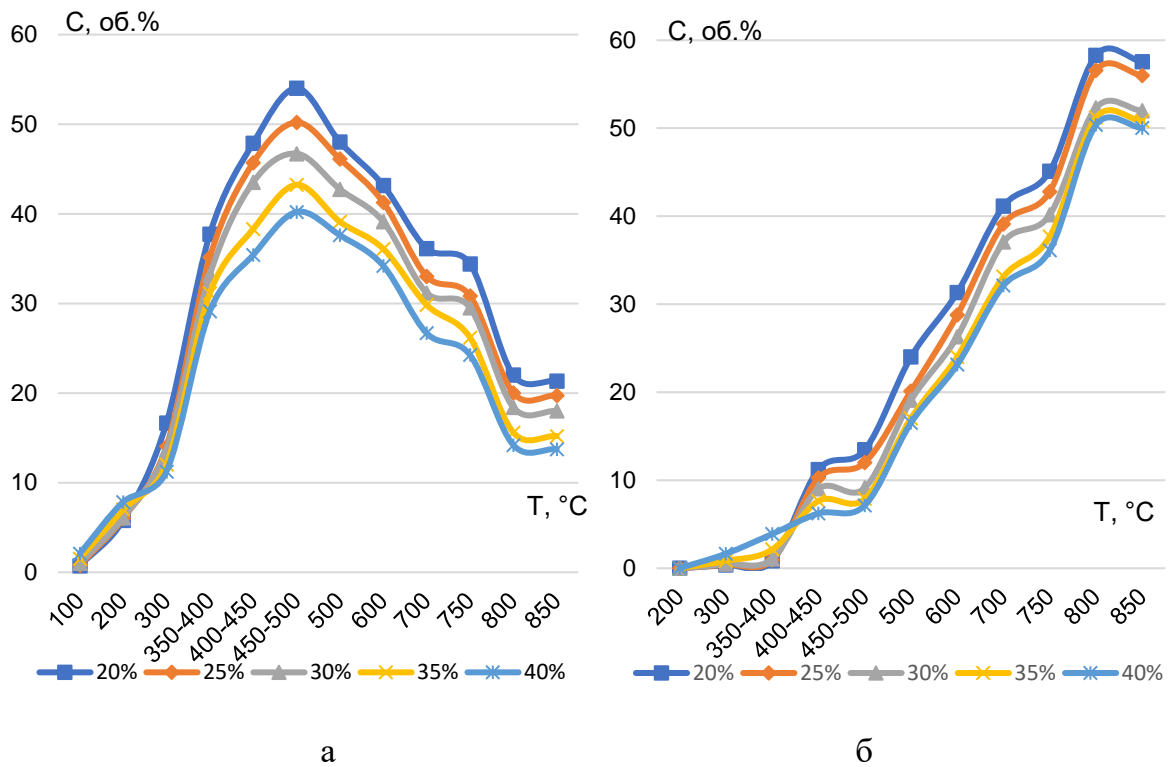


Рисунок 4 – Влияние температуры на содержание CH_4 и H_2 : а – содержание CH_4 в газе в зависимости от содержания ОИАИ; б – содержание H_2 в газе в зависимости от содержания ОИАИ

Таблица 6 – Сводная таблица суммарного содержания CH_4 и H_2 в пирогазе, об.%

t, °C	Количество связующего вещества, мас.%				
	20	25	30	35	40
100	0,74	0,82	1,01	1,54	2,10
200	5,82	6,01	6,11	7,01	7,85
300	17,02	14,47	14,20	12,89	12,90
350-400	38,56	36,11	34,27	33,28	33,04
400-450	59,10	55,95	52,55	45,95	41,64
450-500	67,47	62,21	55,84	51,13	47,35
500	72,03	66,24	61,82	56,15	54,14
600	74,50	70,06	65,44	60,12	57,33
700	77,25	72,15	68,23	62,97	58,81
750	79,55	73,64	69,70	63,90	60,38
800	80,30	76,58	70,73	66,82	64,58
850	78,92	75,74	69,99	66,01	63,75

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что изменение суммарного содержания (об.%) компонентов в составе пиролизного газа является аддитивной величиной, так как коррелирует с опытными данными, рассчитанными по низшей теплоте сгорания (таблица 7).

Таблица 7 – Сравнительная таблица экспериментальных и расчетных значений низшей теплоты сгорания при содержании ОИАИ – 20 мас.%

Количество ОИАИ, мас.%	Температура пиролиза, °С	Низшая теплота сгорания, МДж/м ³ (расч.)	Низшая теплота сгорания, МДж/м ³ (эсп.)
20	100	3,40	3,37
	200	5,31	5,29
	300	12,14	12,51
	350-400	20,10	20,50
	400-450	24,58	25,11
	450-500	27,81	28,61
	500	25,46	26,10
	600	23,69	24,20
	700	21,27	21,65
	750	20,28	20,54
	800	17,00	17,23
	850	16,68	16,88

Проведенные термогравиметрические исследования углеродного остатка (рисунок 5), полученного после пиролиза топливных гранул со связующим веществом (20 мас.%), показали, что процесс пиролиза был проведен полностью, поскольку изменение массы при нагревании до (800-850) °С не превышало 5 мас.%, а при дальнейшем нагревании до 1000 °С – не более 3 мас.%.

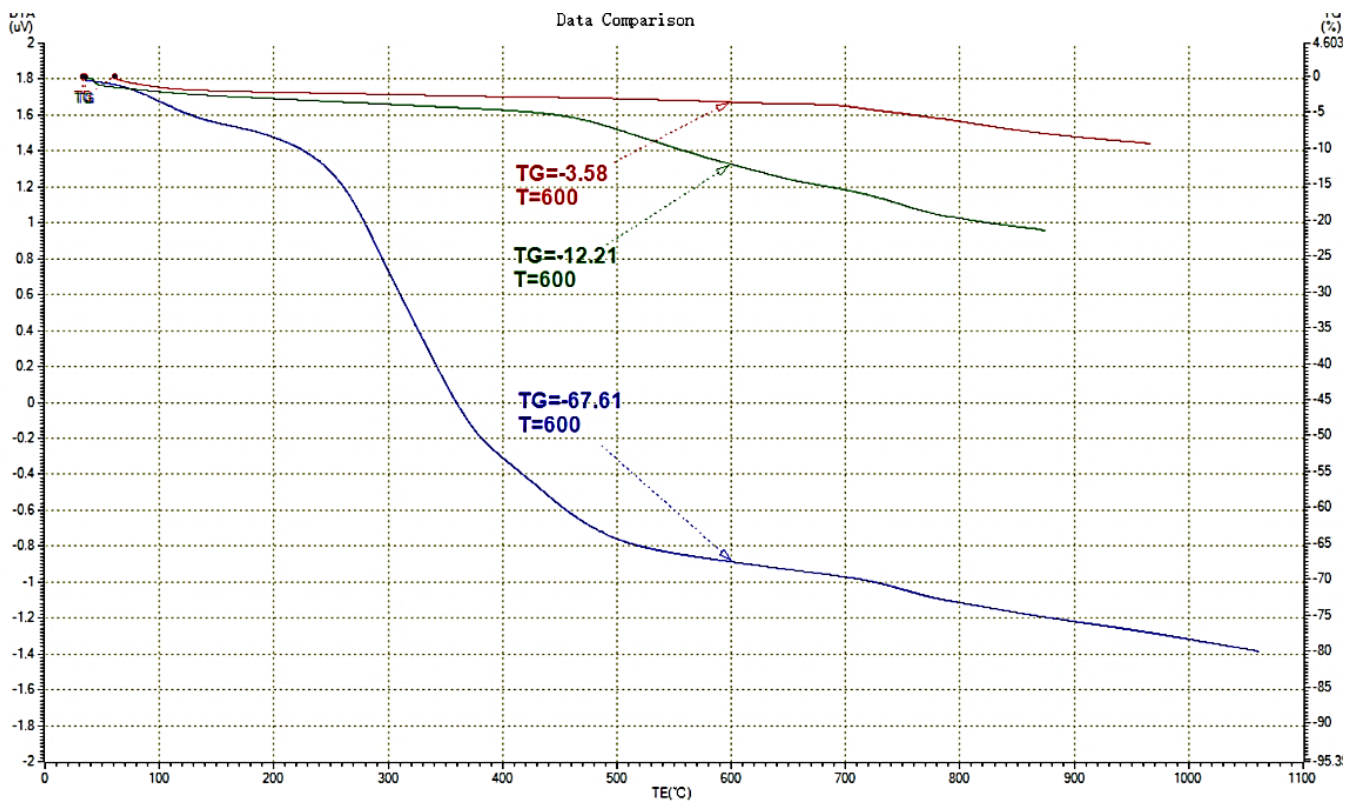


Рисунок 5 – Типичные кривые ТГА углеродного остатка, полученного после пиролиза топливных гранул со связующим веществом (20 мас.%): красный – гранулы после процесса пиролиза; зелёный – исходные некондиционные угольные материалы; синий – исходный ОИАИ

Для обработки экспериментальных данных, а также определения закономерностей и разработки технологических режимов применялся математический метод планирования эксперимента.

Уравнения поверхности отклика:

$$P_w = 0,417T - 0,000294T^2 + 2,11t - 0,0176t^2 - 142,673 \text{ (для } w = 30\%);$$

$$P_T = -1,009w + 2,11t - 0,0176t^2 + 22,597 \text{ (для } T = 500\text{ °C});$$

$$P_t = -1,009w + 0,417T - 0,000294T^2 - 49,163 \text{ (для } t = 60).$$

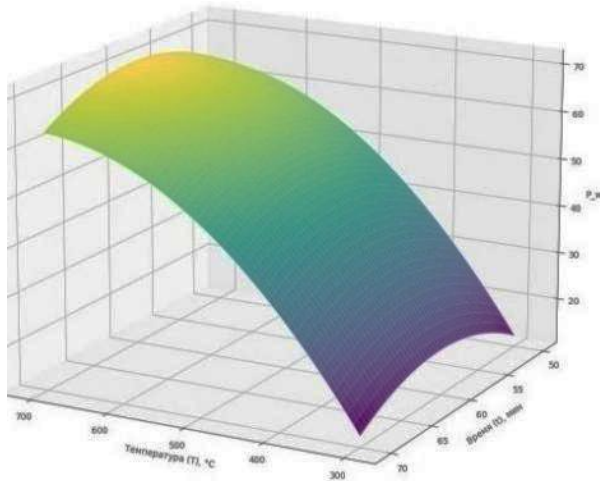


Рисунок 6 – Пример построения поверхности отклика содержания $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ в зависимости от температуры и времени

С целью управления технологическим процессом получения $\text{CH}_4 + \text{H}_2$, об.%, повышения качества процесса пиролиза, а также сокращения времени для обработки конечного результата проведена работа по созданию компьютерной программы для расчета ОЦКП на базе Python (свидетельство о регистрации компьютерной программы RU 2023615118 от 10.03.2023 г.). По полученным уравнениям были построены поверхности отклика для каждого фактора в MATLAB (рисунок 6).

В 4 главе представлено практическое применение проведенных исследований и математического описания полученных результатов, реализованное в виде принципиальной технологической схемы опытно-промышленной установки по термической переработке угольной пыли со связующим.

Во второй части 4 главы проведен тепловой расчёт технологической линии термической переработки топливных гранул. Исходя из проделанных расчётов видно (таблица 8), что тепла от сжигания газа хватит, чтобы полностью обеспечить тепловые затраты технологического производства. После покрытия потребностей технологической установки газ будет направлен сторонним потребителям.

Таблица 8 – Сводные данные по тепловому расчёту технологической линии с содержанием ОИАИ – 20 мас.%, Т пиролиза – 600 °С, производительность до 4 т/сутки

№ п/п	Наименование параметра [24]	Значение
1	Производительность теплотехнологической установки	0,04 кг/с
2	Необходимый расход сухих топливных гранул	0,07 кг/с
3	Количество теплоты, выделившейся при разложении топливных гранул	210 кВт
4	Тепло, необходимое для нагрева сухих топливных гранул до 105 °С	8,48 кВт
5	Количество теплоты, необходимое для термической переработки топливных гранул в углеродистый остаток ($t_{\text{пиролиза}} = 600 \text{ °С}$) [24]	19,41 кВт
6	Количество теплоты с уходящими парами смолы и газом	102,21 кВт
7	Необходимое количество связующего из ОИАИ	0,06 кг/с
8	Количество тепла, необходимое для подсушивания топливных гранул до значения $W_{\text{крит}}$	22,56 кВт
9	Физическое тепло сырья после сушки	9,69 кВт
10	$V_{\text{теор. воздуха}}$, необходимый для полного сгорания газа	5,142 м ³ /м ³
11	Теплота сгорания 1 м ³ газа из топливных гранул	26,90 МДж/м ³
12	Теплота сгорания 1 кг газа из топливных гранул	39,04 МДж/кг
13	Суммарное тепловыделение от сжигания газа [24]	1171,20 кВт
14	Комплексная оценка потенциала компенсации тепловых издержек технологической переработки топливных гранул путем использования теплоты, выделяемой при сжигании газа.	950,29 кВт

В 5 главе приведены сводные данные по технико-экономическим расчетам основных потоков материального баланса. Расчёты и выбор основного оборудования представлены для реализации технологии на опытно-промышленной установке производительностью переработки 1263 т/год исходного сырья.

Отмечено, что реализация предполагаемых технологических решений имеет положительный эффект, учитывая санкционную политику западных стран будет способствовать импортозамещению в области инновационных технологических проектов по термической переработке некондиционных угольных материалов и обезвоженного избыточного активного ила. Материальный баланс по стадиям представлен в таблице 9.

Таблица 9– Сводный материальный баланс технологической установки

Приход, г			Расход, г		
вещество	г	мас. %	вещество	г	мас. %
Сырье			Продукты		
Топливные гранулы:	1000	100,00	Твердый продукт:	534,6	53,46
- угольная пыль	800	80,00	-углеродный остаток		38,08
- ОИАИ	200	20,00	- зольный остаток		15,38
			Жидкий продукт	71,3	7,13
			Пиролизный газ	394,1	39,41
			- CO ₂		7,54
			- CO		11,99
			- CH ₄		43,18
			- H ₂		31,32
			- C _n H _m		5,97
Итого	1000	100	Итого	1000	100

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований в диссертации решена задача разработки технологии совместной термической переработки некондиционных угольных материалов и ОИАИ.

Работа соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологии и техники в Российской Федерации, утвержденным Указом Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. №899, п. «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика».

Основные научные результаты, выводы заключаются в следующем:

1. Установлено, что при проведении термического процесса пиролиза с увеличением температуры и снижением количества связующего вещества увеличивается содержание CH₄ + H₂, об.% в газе. Экспериментально доказано, что использование связующего вещества в пределах (20-30) мас.% от общей массы приводит к достаточно высокому выходу пиролизного газа без разрушения топливных гранул.

2. Установлена и формализована зависимость выхода CH₄ + H₂, об.% от температуры. Определено, что наибольшая калорийность выделяемого газа наблюдается при пиролизе гранул в температурном интервале (450-600) °С за счет

повышенного содержания компонентов $\text{CH}_4 + \text{H}_2$, об. %.

3. Построена математическая модель процесса пиролиза путем анализа влияния основных факторов на процесс пиролиза, а именно влажности материала W , мас. %; температуры процесса T , °C; продолжительности реакции t , мин.

4. Разработана технологическая схема производства $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ из топливных гранул мощностью 1263 т/год, с тепловым расчетом технологической линии.

Перспектива разработки совместной термической переработки некондиционных угольных материалов и обезвоженного избыточного активного ила обусловлена необходимостью повышения эффективности утилизации промышленных и органических отходов при одновременном снижении экологической нагрузки.

Реализация предложенных методов позволит создавать новые источники высокоэнергетического топлива, оптимизировать процесс пиролиза и внедрять энергоресурсотехнологии на промышленных предприятиях.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение закономерностей формирования продуктов переработки и разработку масштабируемых технологических решений для промышленного применения.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

1. **I.V. Bogolubova**, A.G. Ushakov, E.S. Ushakova Gas Liberation in High-Temperature Pyrolysis of Coal Wastes with Binder // *Coke and Chemistry*. 2022. Vol. 65, No. 10. Pp. 459-463. (**Scopus, Springer**)

2. **I.V. Bogolubova**, A.G. Ushakov, E.S. Ushakova Pyrolysis of Carbon-Bearing Materials: Three-Factor Experiment and Simulation // *Coke and Chemistry*. 2022. Vol. 65, No. 11. Pp. 558-563. (**Scopus, Springer**)

Публикации в прочих изданиях:

1. Козлова И.В. Использование метода анаэробного сбраживания для решения проблемы накопления избыточного активного ила / **И.В. Козлова**, А.Г. Ушаков, Е.С. Ушакова // *Ползуновский вестник*. – 2016. – № 1. – С. 64-66.

2. Ушаков А.Г. Технологическое оформление схемы совместного использования продуктов переработки угля и органических отходов / А.Г. Ушаков, Е.С. Ушакова, **И.В. Боголюбова** // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – № 1 (137). – С. 85-90.

3. Ушаков А.Г. Техногенное сырье предприятий добычи и переработки твердых горючих ископаемых как перспективный источник энергоресурсов / А.Г. Ушаков, Е.С. Ушакова, **И.В. Боголюбова** // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – №1 (137). – С. 91-97.

4. Ушаков А.Г. Влияние изменения состава исходной сырьевой смеси на свойства получаемого гранулированного твердого топлива / А.Г. Ушаков, Е.С. Ушакова, И.В. Боголюбова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 4 (146). – С. 21-28. – DOI 10.26730/1999-4125-2021-4-21-28.

Публичные доклады на международных и всероссийских научных мероприятиях (конференциях, съездах, симпозиумах, конгрессах):

1. Боголюбова И.В. Формование топливных гранул из некондиционных углеродных материалов и ОИАИ / **И.В. Боголюбова**, А.Г. Ушаков // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: материалы I международной VII Всероссийской конференции, Кемерово, 27 – 29 ноября 2024 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2025. – С. 401.1-401.6.

2. Боголюбова И.В. Обработка данных процесса пиролиза углеродсодержащих веществ с помощью программно-алгоритмического средства / **И.В. Боголюбова** // Кузбасс: образование, наука, инновации: Материалы XI Инновационного конвента, Кемерово, 08 февраля 2023 года. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2023. – С. 402-405.

3. Боголюбова И.В. Изучение влияния различных составов сырья на изменение свойств топливных гранул / **И.В. Боголюбова**, Е.С. Ушакова // Россия молодая: Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 20 – 23 апреля 2021 года /

Редколлегия: К.С. Костиков (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2021. – С. 73601.1-73601.4.

4. Ushakov A.G. Technogenic coal formations – promising raw materials for improvement of mining and processing enterprises energy independence / A.G. Ushakov, E.S. Ushakova, **I. Bogolyubova**, G. Alibaeva // E3S Web of Conferences: 5, Kemerovo, 19 – 20 October, 2020. – Kemerovo, 2020. – P.02005.

5. Боголюбова И.В. Изучение распределения фракционного состава при гранулировании смеси угольных и органических отходов / **И.В. Боголюбова**, А.Г. Ушаков // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: Материалы XIII Международной научно-практической конференции, Кемерово, 26 – 27 ноября 2019 года / Под редакцией С.Г. Костюк. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2019. – С. 303-1-303-4.

6. Боголюбова И.В. Переработка угольных отходов с помощью высокотемпературного процесса пиролиза / **И.В. Боголюбова**, Е.С. Ушакова, А.Г. Ушаков // Инновационный конвент «Образование, наука, инновации. Молодежный вклад в развитие научно-образовательного центра «Кузбасс»: Материалы Инновационного конвента, Кемерово, 13 декабря 2019 года. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2019. – С. 394-396.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615118 Российская Федерация. Программа обработки данных трехфакторного эксперимента и расчета математической модели процесса пиролиза углеродсодержащих веществ: № 2023613116 : заявл. 17.02.2023 : опубл. 10.03.2023 / А.Г. Ушаков, Е.С. Ушакова, И.В. Боголюбова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева».