Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

(РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина)

119991, г. Москва, Ленинский просп., д. 65, корп. 1, телефон: (499) 507-88-88 (многоканальный)
ОКПО 02066612; ОГРН 1027739073845; ИНН/КПП 7736093127/773601001
E-mail: com@gubkin.ru; http://www.gubkin.ru

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
к.т.н., доцент
_____ **П. К. Калашников**
«__» сентября 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию **Боголюбовой Ирины Владимировны** на тему «Разработка технологии совместной термической переработки некондиционных угольных материалов и обезвоженного избыточного активного ила», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ (технические науки)

Актуальность работы

Термическая переработка углеродсодержащих отходов является одним из перспективных направлений химической технологии твёрдого топлива. Промышленные предприятия Кузбасса ежегодно накапливают значительные объёмы некондиционных угольных материалов – угольной пыли и шламов, которые практически не вовлекаются в производственный цикл. Одновременно городские очистные сооружения генерируют постоянный поток обезвоженного избыточного активного ила (ОИАИ), утилизация которого остаётся нерешённой задачей.

Автором предложено использовать ОИАИ как связующее вещество при гранулировании некондиционных угольных материалов с последующим пиролизом для получения высококалорийного пиролизного газа. Такой

подход позволяет одновременно решить проблему утилизации двух видов техногенных отходов, получив при этом товарный энергетический продукт.

Научная новизна

Впервые методом термогравиметрического анализа обоснована верхняя температурная граница пиролиза гранул на основе ОИАИ (600 °С): при более высоких температурах убыль массы не превышает (5–7) мас.%, что свидетельствует о нецелесообразности дальнейшего нагрева.

Впервые определена область оптимальных параметров совместного пиролиза (содержание ОИАИ (20–30) мас.%, температура (450–600) °С, продолжительность ~60 мин), обеспечивающая получение пиролизного газа с наибольшим суммарным содержанием $CH_4 + H_2$ и максимальным тепловым эффектом сгорания.

Впервые построена квадратичная регрессионная модель влияния влажности сырья (W, %), температуры (T, °C) и продолжительности (t, мин) процесса на содержание горючих компонентов в пиролизном газе по плану ортогонального центрально-композиционного планирования второго порядка (ОЦКП); адекватность модели подтверждена критерием Фишера. На основе модели разработан программный комплекс (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023615118 от 10.03.2023).

Теоретическая и практическая значимость работы:

- научно обоснована технология переработки некондиционных углеродсодержащих материалов и органических отходов городских очистных сооружений (ОИАИ), обеспечивающая получение пиролизного газа с высокой теплотворной способностью;
- установлены закономерности взаимодействия компонентов сырьевой смеси и обосновано влияние содержания ОИАИ в составе топливных гранул на их прочностные характеристики, а также на качественный и количественный состав образующегося пиролизного газа;
- разработано математическое описание влияния основных технологических факторов процесса термической переработки топливных гранул на показатели процесса и состав газообразных продуктов;
- установлено, что получаемые топливные гранулы могут быть использованы для пиролизной переработки с получением газовой смеси $CH_4 + H_2$, рекомендуемой в качестве альтернативного топлива

для технологических процессов с использованием пиролизных установок;

- разработанные технологические решения могут быть внедрены на предприятиях – источниках образования некондиционных углеродсодержащих материалов и ОИАИ, а также на предприятиях, реализующих технологии их переработки с получением высококалорийного газа;
- создан программно-алгоритмический комплекс (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2023615118 от 10.03.2023 г.), позволяющий прогнозировать содержание компонентов газовой смеси $CH_4 + H_2$.

Обоснованность и достоверность

Обоснованность и достоверность результатов подтверждаются корректной постановкой задач, использованием стандартизованных методик и поверенного оборудования при проведении экспериментальных исследований, воспроизводимостью полученных данных, применением методов статистической обработки, а также согласованностью результатов, полученных с помощью различных физико-химических методов анализа.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 2 статьи в изданиях, индексируемых в международной базе данных научного цитирования Scopus. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Результаты исследований представлены на международных и всероссийских конференциях.

Общая характеристика диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня обозначений и сокращений, списка использованной литературы и источников, включающего 128 наименований, и 3 приложений. Общий объём работы – 163 страницы, включая 45 рисунков и 56 таблиц.

Во введении диссертационной работы Боголюбовой И.В. сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет изучения. В этом же разделе представлены основные положения, выносимые на защиту, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также приведены данные об апробации результатов и публикациях.

Первая глава посвящена анализу литературы по вопросам утилизации угольных отходов и осадков сточных вод. Показано, что угольные отходы образуются на всех этапах переработки угля и практически не используются, а их накопление в отвалах сопровождается риском самовозгорания и негативным экологическим воздействием. Наиболее эффективным способом переработки мелкодисперсных угольных отходов признано гранулирование. Подробно рассмотрены свойства ОИАИ как потенциального связующего: высокое содержание органического углерода, наличие тяжёлых металлов, ограничивающее его применение в агротехнике, и значительный энергетический потенциал. Приведены литературные данные о термическом поведении различных видов твёрдого топлива, температурных интервалах деструкции, составе пиролизного газа при разных условиях, а также методах газификации твёрдых горючих ископаемых. Глава формирует теоретическую основу для выбора объектов исследования и постановки экспериментальной программы.

Вторая глава посвящена описанию объектов и методов исследования. В качестве сырья использованы мелкодисперсная угольная пыль с коксохимических предприятий Кемеровской области и ОИАИ городской станции аэрации г. Кемерово. Изложены методики формования гранул на барабанном грануляторе и их последующей сушки, определения механической прочности при истирании по ГОСТ 21289–2018, проведения пиролиза в трубчатой печи, хроматографического анализа состава пиролизного газа, калориметрического определения теплоты сгорания, атомно-абсорбционного анализа металлов и термогравиметрического анализа исходного сырья. Описана методология построения математической модели на основе ортогонального центрально-композиционного планирования второго порядка с проверкой адекватности по статистическим критериям.

Третья глава является основной экспериментальной частью работы. Проведена детальная характеристика исходного сырья: выполнены технический и элементный анализ образцов угольной шихты различных марок и ОИАИ, установлено, что содержание тяжёлых металлов в иле находится в пределах нормы. Данные термогравиметрического анализа показали, что активное выделение летучих для обоих видов сырья завершается при 600 °C, что обосновывает верхнюю температурную границу процесса пиролиза.

Исследовано влияние содержания ОИАИ на механическую прочность гранул, установлено, что при превышении определённого порога гранулы не сохраняют форму, тогда как в оптимальном диапазоне прочность соответствует требованиям практического применения. Проведена серия

пиролизных экспериментов при варьировании температуры и состава гранул: показано, что содержание CH_4 проходит через максимум в среднетемпературной области, тогда как H_2 монотонно возрастает с температурой.

Наибольший суммарный выход горючих компонентов и тепловой эффект достигаются в диапазоне (450–600) °C при содержании ОИАИ 20–30 мас.%. Составлен материальный баланс процесса, дана характеристика углеродистого остатка и жидких продуктов пиролиза. Построена математическая регрессионная модель, связывающая содержание $CH_4 + H_2$ в пиролизном газе с тремя факторами – влажностью сырья, температурой и продолжительностью процесса. Адекватность модели подтверждена статистически. На основе модели разработан программный комплекс на языке Python с возможностью построения поверхностей отклика.

Четвертая глава посвящена разработке промышленно-технологической схемы совместной термической переработки некондиционных угольных материалов и ОИАИ.

Схема включает последовательные стадии: приём и дозирование сырья, смешение компонентов, гранулирование, сушку, пиролиз, охлаждение и разделение продуктов.

Описано назначение каждого аппарата и характеристика технологических потоков – от исходного сырья до пиролизного газа, углеродистого остатка, смолы и дымовых газов.

Предусмотрено автономное теплоснабжение установки за счёт сжигания части получаемого пиролизного газа в топочном устройстве. Выполнен тепловой расчёт технологической линии, показавший, что тепла, выделяемого при сжигании газа, достаточно для покрытия всех тепловых затрат процесса с запасом, направляемым сторонним потребителям.

Пятая глава содержит технико-экономическое обоснование разработанной технологии применительно к опытно-промышленной установке. Приведены расчёт стоимости основного оборудования с амортизационными отчислениями, себестоимость продукции с разбивкой по статьям затрат – сырьё, энергоресурсы, заработная плата, социальные отчисления, расходы на содержание оборудования.

Итоговые экономические показатели свидетельствуют об инвестиционной привлекательности проекта: при принятой оптовой цене на пиролизный газ установка генерирует положительную чистую прибыль при относительно коротком сроке окупаемости, что подтверждает экономическую целесообразность реализации предложенной технологии.

В заключении диссертации обобщены основные результаты выполненного исследования: обоснована принципиальная возможность совместной термической переработки заданных видов отходов, определены рациональные составы топливных гранул и температурно-временные параметры процесса пиролиза, обеспечивающие получение высококалорийного газа, предложено математическое описание процесса, разработана технологическая схема и подтверждена экономическая целесообразность предложенного решения. Выводы, представленные в заключении, соответствуют цели и задачам исследования и свидетельствуют о достижении планируемых результатов.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертации.

Несмотря на несомненные достоинства работы, существует ряд **замечаний:**

1. Литературный обзор диссертации отличается полнотой и включает широкий спектр отечественных и зарубежных исследований, посвященных термической переработке углеродсодержащих материалов. Однако для повышения актуальности обзора целесообразно было бы дополнить его статистическими данными последних лет, отражающими масштабы образования и накопления угольных отходов и осадков сточных вод (стр. 11-15).

2. В диссертации (стр. 41–42) описан процесс получения топливных гранул в барабанном грануляторе, однако отсутствует сравнительная оценка этого метода с альтернативными технологиями окускования. Рекомендуется дополнить работу кратким обоснованием выбранного способа, отражающим преимущества сферической формы гранул для процессов тепломассообмена в пиролизном реакторе.

3. В тексте диссертации встречается непоследовательное использование сокращений «ОИАИ» и «ИАИ». Так, на стр. 4 используется обозначение «ИАИ», тогда как далее по тексту применяется сокращение «ОИАИ», что требует унификации терминологии.

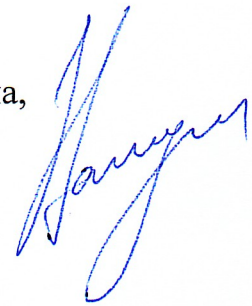
Приведённые замечания носят рекомендательный характер и на значимость диссертационной работы влияния не оказывают.

Рассмотренная диссертационная работа Боголюбовой Ирины Владимировны на тему «Разработка технологии совместной термической переработки некондиционных угольных материалов и обезвоженного избыточного активного ила» отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-

технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103 ОД, а её автор, Боголюбова Ирина Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ (технические науки).

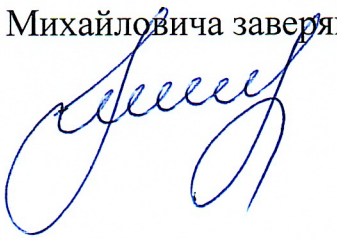
Диссертационная работа обсуждена и одобрена на заседании кафедры технологии переработки нефти, протокол заседания № 10 от «24» июня 2026 г.).

Заведующий кафедрой
технологии переработки нефти
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина,
профессор, д.т.н.
Рабочий телефон: +7 (499) 507-85-98
e-mail: kapustin.v@gubkin.ru



В.М. Капустин

Подпись Капустина Владимира Михайловича заверяю:
Начальник отдела кадров



Ю.Е. Ширяев