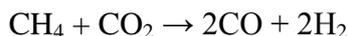
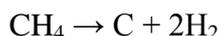


ционально общему времени осуществления процесса и, как следствие, возрастает эффективность переработки.

Наличие микроволновых поглотителей сказывается на составе генерируемого газа. Более интенсивный нагрев приводит к повышению доли водорода (на 4–13 %) и монооксида углерода (на 7–20 %), однако при этом доля метана снижается. Кроме того, практически полностью отсутствует диоксид углерода. Происходящие изменения можно объяснить ростом температуры процесса за счет более эффективного поглощения СВЧ-излучения, что приводит к протеканию реакций разложения метана и его взаимодействия с диоксидом углерода [8]:



Таким образом, можно прийти к выводу, что использование микроволновых поглотителей на основе железа в количестве 10 % от общей массы образца позволяет повысить эффективность процесса СВЧ-пиролиза, а также увеличить долю водорода в составе газообразных продуктов.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект РНФ № 24-79-10113 «Разработка CO<sub>2</sub>-нейтральной технологии получения полифункциональных катализаторов на основе металлов с разной электроотрицательностью для СВЧ-пиролиза твердого органического сырья»).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесникова А.В. Анализ образования и использования древесных отходов на предприятиях лесопромышленного комплекса России // Актуальные вопросы экономических наук. – 2013. – № 33. – С. 116–120.
2. Дитрих В.И., Андрияс А.А., Пережилин А.И., Корпачев В.П. Оценка объемов и возможные пути использования отходов лесозаготовок на примере Красноярского края // Хвойные бореальной зоны. – 2010. – Т. 27. – № 3–4. – С. 346–351.
3. Тунцев Д.В., Хисматов Р.Г., Касимов А.М., Романчева И.С., Савельев А.С. Схема контактного пиролиза отходов лесозаготовки // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – № 2–3. – С. 146–149.
4. Тунцев Д.В., Сафин Р.Г., Касимов А.М., Хайруллина Э.К., Мусин Х.Г., Савельев А.С. Промышленная установка двух-этапной термической переработки отходов лесного комплекса // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 15. – С. 132–134.
5. Arpia A.A., Chen W.H., Lam S.S., Rousset P., de Luna M.D.G. Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: A comprehensive review // Chemical Engineering Journal. – 2021. – Vol. 403. – Art. no 126233. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.126233>
6. Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза твердых органических топлив / Р.Б. Табакаев, И.Д. Димитрюк, И.К. Калинич, А.В. Астафьев, А.В. Гиль, К.Т. Ибраева, П.Ю. Чумерин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 12. – С. 190–199. DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3789
7. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. – СПб.: 1998. – 256 с.: ил.
8. Лебедев Ю.А., Шахатов В.А. Разложение CO<sub>2</sub> в тлеющем разряде (аналитический обзор) // Успехи прикладной физики. – 2022. – Т. 10. – № 4. – С. 323. DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-323-342

## ВЛИЯНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ НА ПРОЧНОСТЬ БИОУГОЛЬНЫХ ГРАНУЛ

И.Д. Димитрюк<sup>1,2</sup>, К.Т. Ибраева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тюменский государственный университет

<sup>2</sup> Томский политехнический университет, ИШЭ, ТПТ, группа АЗ-44

Использование биоугля в энергетике становится все более важным в условиях глобальных изменений климата и ограниченности традиционных источников энергии. Биоуголь, получа-

емый из органических отходов растительной биомассы через процесс пиролиза, представляет устойчивую альтернативу традиционным топливам. Его преимущества заключаются не только в высокой теплотворной способности, которая составляет свыше 26,1 МДж/кг [1], но и в экологических аспектах, связанных с его получением и использованием.

Одним из основных факторов внедрения биоугля в энергетический сектор является его способность снижать выбросы углекислого газа. В отличие от сжигания, процесс которого приводит к быстрому возврату углерода в атмосферу, при этом использование биоуголь в качестве мелиоранта позволяет сохранить углерод в почве на протяжении сотен и тысяч лет, что способствует секвестрации углерода и представляет собой эффективный инструмент борьбы с изменением климата. Кроме того, свойства биоугля позволяют эффективно адсорбировать загрязняющие вещества, включая тяжелые металлы и органические соединения, что делает его полезным для очистки промышленных сточных вод и газов.

Прочность гранул является одним из ключевых параметров, определяющих их функциональность и устойчивость в различных условиях эксплуатации. Гранулирование биоугля представляет собой дополнительное преимущество, поскольку значительно улучшается транспортные характеристики и компактность хранения топлива. Тем самым снижая затраты на логистику. Более того, брикетирование позволяет добиться однородности топливной массы, что способствует стабильности характеристик сжигания и повышает общую эффективность использования биоугля как источника энергии.

Одним из важных параметров, оказывающих влияние на прочностные характеристики биоугольных гранул, является влажность смеси. На этапе гранулирования количество воды влияет на взаимодействие между частицами, а также на процессы связывания и уплотнения. Неправильный выбор доли влажности может привести к образованию слабых гранул, которые легко разрушаются при механических воздействиях или в процессе транспортировки и хранения. С другой стороны, чрезмерная влажность может препятствовать полимеризации связующего вещества, которое отвечает за прочность гранул.

Целью данной работы является исследование влияния влажности на прочность гранул из биоугля скорлупы кедрового ореха, а именно экспериментальные исследования, направленные на выявление оптимальных условий гранулирования, которые обеспечивают максимальную прочность гранул.

### **Методика исследования**

В качестве объектов исследования рассмотрены пробы скорлупы кедрового ореха (СКО) и крахмал. Согласно схеме (рис. 1), пробу СКО термически перерабатывали с помощью метода пиролиза при температуре 600 °С и после охлаждения измельчали до фракции 0,2–0,5 мм. Далее приготавливали смесь твердого углеродистого остатка с раствором связующего вещества (5 и 7 % в соотношении к углеродистому остатку) с различной влажностью – 10, 20, 30, 40, 50 %. Из полученной смеси формировали гранулы с дальнейшей сушкой при температуре 80 °С. Для оценки механической прочности полученных гранул проводили испытания на истирание согласно ГОСТ 34090.1-2017 «Биотопливо твердое. Определение механической прочности пеллет и брикетов».

В соответствии с описанной методикой (рис. 2), полученные биоугольные гранулы 2 взвешивали и помещали во вращающийся контейнер 1, который за счет привода 3 вращался и достигнув 500 оборотов останавливался. В процессе испытания происходило опрокидывание и перемещение гранул с истиранием. По истечению испытания содержимое контейнера высыпали и просеивали, при этом исключая частицы с размером менее 3,15 мм. Массу гранул измеряли на высокоточных весах с дискретностью 0,1 мг (ГОСМЕТР, Россия) до начала и после завершения испытания.

Обработку результатов осуществляли следующим образом:

$$DU^r = \frac{m_a}{m_0} \cdot 100, \% \quad (1)$$

где  $m_a$  – масса образца после испытания и просеивания, г;  $m_0$  – масса образца до испытания (начальная масса), г.



Рис. 1. Схема получения биоугольных гранул

### Результаты и анализ

Характеристики углеродистого остатка SCO представлены в табл. 1. Можно отметить, что это биоуголь имеет низкое содержание золы ( $A^d=1,5\%$ ), высокую теплотворную способность ( $Q_i^r = 28,3$  МДж/кг) и значительное содержание углерода ( $C^{daf} = 89,3\%$ ) по сравнению с углеродными остатками различных видов растительной биомассы и близкие к каменному углю [1]. Эти параметры делают его перспективным сырьем для гранулирования конкурентоспособного топлива в энергетике, а также при рассмотрении в сельском хозяйстве.

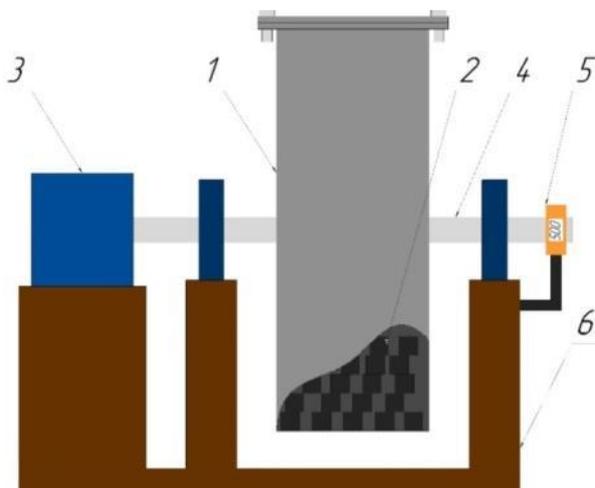


Рис. 2. Лабораторный стенд для проведения испытаний на механическую прочность гранул: 1 – вращающийся корпус; 2 – гранулы; 3 – привод; 4 – вал; 5 – счетчик оборотов; 6 – рама

Таблица 1. Теплотехнические характеристики и элементный состав углеродистого остатка SCO

Характеристика	Значение
Зольность $A^d$ , %	1,5
Низшая теплота сгорания $Q_i^r$ , МДж/кг	28,3
$C^{daf}$	89,3
$H^{daf}$	2,7
$N^{daf}$	0,6
$S^{daf}$	0,0
$O^{daf}$	7,4

Анализ прочностных характеристик изготовленных гранул позволил сделать следующие выводы (рис. 3). Наблюдается, что с увеличением влажности для гранул с 5 % содержанием связующего механическая прочность возрастает до достижения 30 % влажности, после чего прочность начинает снижаться, при этом примечательно, что гранула не формируется при 50 % влажности. Для гранул с 7 % содержанием связующего наблюдается аналогичная тенденция, однако максимальный рост прочности фиксируется до 40 % влажности. Это связано с тем, что более высокое содержание связующего делает смесь гуще, что позволяет использовать более высокий уровень влажности для достижения большей прочности брикетов.

Кроме того, гранулы с 5 % содержанием связующего и влажностью в диапазоне от 20 до 40 %, а также гранулы с 7 % содержанием связующего и влажностью от 20 до 50 %, демонстрируют механическую прочность, соответствующую требованиям ( $\Delta U_r > 80\%$ ) для применения в качестве топлива для энергетических и коммунально-бытовых нужд [4].

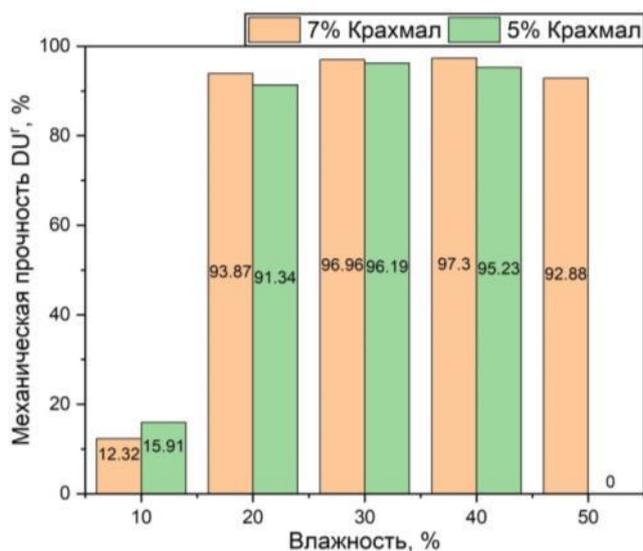


Рис. 3. Механические характеристики гранул

### Заключение

Биоуголь из скорлупы кедрового ореха и связующее в виде крахмала могут быть использованы для производства прочных биоугольных гранул. Исследования показали, что влажность смеси для формования гранул существенно влияет на механическую прочность этих гранул. Например, оптимальные условия влажности способствуют улучшению прочности, что позволяет получить гранулированное топливо, соответствующее требованиям для использования в различных целях. Установлено, что недостаток влаги приводит к образованию хрупких гранул, а избыток влаги может негативно сказаться на формировании гранул.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 23-79-01296.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Comparative analysis of conventional and microwave pyrolysis of raw materials with different degree of metamorphism / K. Ibraeva, A. Astafev, I. Dimitryuk, R. Tabakaev, I. Kalinich, I. Shanenkov // Energy conversion and management. – 2024. – V. 301. – P. 118067.
2. Influence of biochar amendment obtained from organic wastes typical for Western Siberia on morphometric characteristics of plants and soil properties / K. Ponomarev, A. Pervushina, K. Korotaeva et al. // Biomass Conv. Bioref. – 2023. – V. 14. – P. 28849–28860.
3. Биоуголь продукт быстрого пиролиза // ЭЛП Групп. – URL: <https://energolesprom.ru/poleznye-stati/biougol/> (дата обращения 05.11.2024).
4. ГОСТ 57016–2016. Брикетты каменноугольные для энергетических и коммунально-бытовых нужд. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2016. – 7 с.