

Секция 4

Экологические проблемы энергетики

БИО-УГОЛЬНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ КОМПОЗИЦИИ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ СВЧ-ПИРОЛИЗА

И. Калинич¹, Р.Б. Табакаев²

¹ Томский политехнический университет, ОЭФ

² Тюменский государственный университет, X-ВЮ. Лаборатория РТТПБ

¹ Научный руководитель: А.В. Мостовщиков, д.т.н., профессор, ОХИ ТПУ

По оценкам экспертов [1] ископаемое топливо (уголь, природный газ, нефтепродукты) на протяжении значительного времени будет оставаться основным ресурсом в топливно-энергетическом балансе. Однако традиционная энергетика является одним из главных источников выбросов парниковых газов и вредных веществ (NO_x, SO_x, CO и др.) [2]. Стремясь снизить количество таких выбросов, активно внедряются технологии на возобновляемых источниках энергии, в частности CO₂-нейтральной биомассы. Одним из перспективных направлений в данный момент рассматривается использование био-угольных топливных композиций и бездымного топлива на их основе [3, 4].

В последнее время активно развивается направление СВЧ-пиролиза органических топлив с целью получения ценных энергетических продуктов для энергетики, химической и металлургической промышленности. Этот подход представляется актуальным из-за многочисленных преимуществ использования микроволновой энергии, наиболее значимыми из которых являются сокращение времени и энергетических затрат процесса [5]. Развитие данного направления требует расширения имеющихся знаний в данной области. В связи с этим целью настоящей работы является экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза био-угольных топливных композиций на основе каменного угля и навоза крупнорогатого скота.

Экспериментальные исследования выполнены на лабораторном стенде СВЧ-пиролиза (рис. 1), подробно описанным в работе [6]. В качестве объекта исследования рассмотрены каменный уголь и навоз крупнорогатого скота (табл. 1), и топливные композиции на их основе (доля навоза в угле – 10 и 20 % мас.). Пробы предварительно выдерживали до воздушно-сухого состояния, измельчали менее 200 мкм, затем прессовали в гранулы массой 3 г (диаметр 12 мм). Гранулы размещали в кварцевой трубке реактора, после чего генерировали СВЧ-излучение при помощи магнетрона (частота 2,45 ГГц, мощность 750 Вт). Поглощая излучение, образец нагревался, в результате чего происходила его термическая деструкция с выделением «летучих» продуктов (пары смолы и пирогенетической воды, газа). Летучие

продукты направляли через систему очистки в газоанализатор для определения состава генерируемого газа. Углеродистый остаток извлекали, взвешивали его массу, составляли материальный баланс.

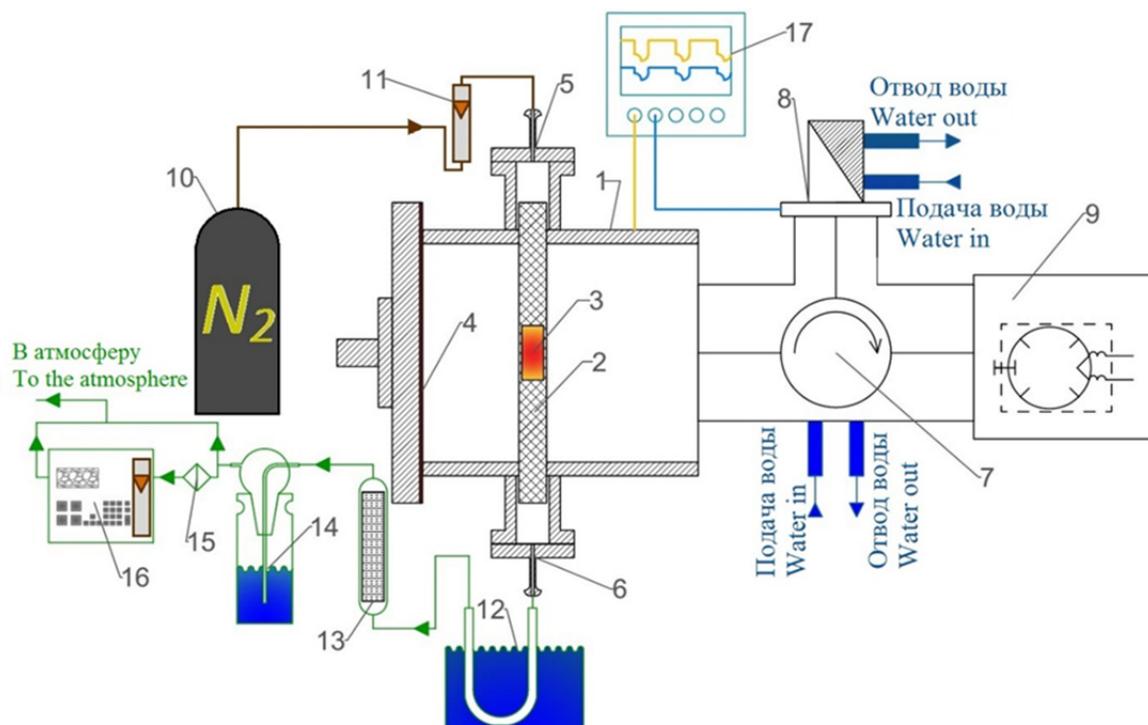


Рис. 1. Установка микроволнового пиролиза:

- 1 – реактор, 2 – кварцевая трубка, 3 – цилиндрический образец,
4 – подвижная мембрана с механизмом регулировки, 5 – штуцер подачи азота,
6 – штуцер отвода газа; 7 – микроволновый циркулятор, 8 – нагрузка,
9 – магнетронный СВЧ генератор, 10 – бак с азотом, 11 – ротаметр, 12 – теплообменник,
13 – стеклянный фильтр, 14 – гидравлический затвор, 15 – фильтр очистки пробы
(PTFE, пористость 0,2 мкм), 16 – газоанализатор, 17 – осциллограф

Таблица 1. Теплотехнические характеристики исходного сырья
и топливных композиций на его основе

Образец	Рабочая влажность, %	Зольность на сухую массу вещества, % мас.	Выход легучих веществ, % мас.	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Элементный состав на сухую массу вещества, % мас.				
					C^d	H^d	N^d	S^d	O^d
Каменный уголь (КУ)	10,6	8,3	37,7	24,88	74,00	4,11	2,25	0,45	10,89
Навоз (Н)	9,0	15,6	75,2	14,92	45,05	4,98	2,27	0,19	31,91
КУ (90) + Н (10)	10,4	9,0	41,6	23,88	71,11	4,20	2,25	0,42	13,02
КУ (80) + Н (20)	10,3	9,8	45,2	22,89	68,21	4,28	2,25	0,40	15,06

Результаты проведенного исследования показаны на рис. 2 и табл. 2. Видно, что при пиролизе исходного сырья (каменного угля и навоза) получен пиролизный газ с высоким содержанием водорода (21 и 31 % об. для навоза и каменного угля соответственно). При этом газ, полученный из каменного угля, практически не содержит диоксида углерода. Используя методику [7], определена теплотворная способность полученных газов по их компонентному составу: Q_i^d для газа из навоза – 21,32 МДж/м³, Q_i^d для газа из каменного угля – 24,16 МДж/м³. Полученные результаты согласуются с литературными данными [8, 9].

Стоит отметить, что в составе пиролизного газа (рис. 2), полученного из био-угольных композиций, отсутствует диоксид углерода (CO_2), который должен присутствовать при расчетной оценке (табл. 3). Остальные определенные компоненты газовой смеси (H_2 , CO и CH_4) отличаются от расчетных значений менее чем на 10 % отн. При этом добавление навоза к каменному углю позволяет существенно сократить время на инициирование процесса: добавление 10 % навоза – в 3.1 раза, 20 % – в 3.7 раза.

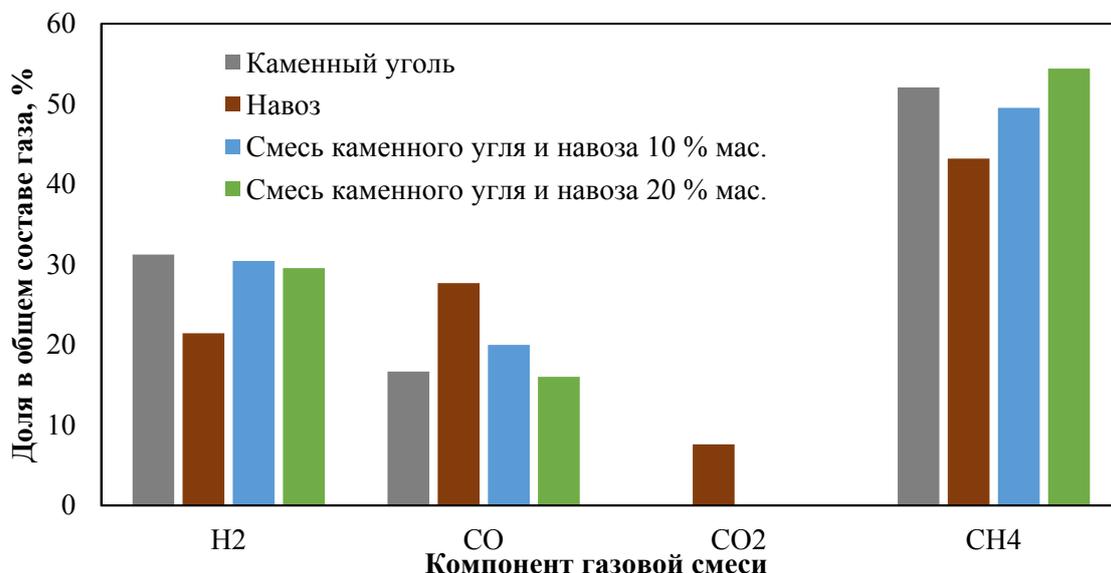


Рис. 2. Экспериментально полученный состав пиролизного газа

Таблица 2. Времена инициирования процесса СВЧ-пиролиза в зависимости от перерабатываемого сырья

Параметр	Перерабатываемое сырье			
	Каменный уголь (КУ)	Навоз (Н)	КУ 90 %, Н 10 %	КУ 80 %, Н 20 %
Время инициирования процесса, с	660	76	211	179
Выход твердого продукта, %	62,0	34,5	60,1	56,5

Таблица 3. Состав генерируемого пиролизного газа, полученный расчетным путем

Перерабатываемое сырье	Состав генерируемого газа, %				Теплота сгорания Q_i^d , МДж/м ³
	Водород (H_2)	Монооксид углерода (CO)	Диоксид углерода (CO_2)	Метан (CH_4)	
Каменный уголь (90 %) и навоз (10 %)	30,3	17,8	0,8	51,1	23,85
Каменный уголь (80 %) и навоз (20 %)	30,5	17,6	0,6	51,3	23,91

Таким образом, можно прийти к выводу, что добавление биомассы (например, навоза крупнорогатого скота в количестве 10–20 % по массе) к углю позволяет существенно снизить время инициирования процесса СВЧ-пиролиза (более чем в 3 раза). При этом теплотворная способность газа изменяется несущественно, а состав генерируемого газа можно предварительно оценивать расчетным путем, зная выход и состав продуктов для каждого из компонентов био-угольной смеси.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект РНФ № 22-19-00410 «Разработка научно-технических основ технологии получения продуктов СВЧ-пиролиза из био-угольных композиций»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jiang L., Xue D., Wei Z., Chen Zh., Mirzayev M., Chen Y., Chen Sh. Coal decarbonization: A state-of-the-art review of enhanced hydrogen production in underground coal gasification // *Energy Reviews*. – 2022. – Vol. 1. – Iss. 1. – Art. no 100004. <https://doi.org/10.1016/j.enrev.2022.100004>
2. World Energy Outlook Special Report (2016) Energy and air pollution. International Energy Agency, Paris.
3. Косторева Ж.А. Обоснование параметров древесно-угольных смесей в качестве топлива котельных агрегатов: диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук. – 2022, 110 с.
4. Sahu S.G., Chakraborty N., Sarkar P. Coal–biomass co-combustion: An overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 39. – P. 575–586. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.106>
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. Калинин, 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. Fernández Y., Menéndez J.A. Influence of feed characteristics on the microwave-assisted pyrolysis used to produce syngas from biomass wastes // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2011. – Vol. 91. – P. 316–322. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.03.010>
9. Matamba T., Tahmasebi A., Yu J., Keshavarz A., Abid H.R., Iglauer S. A review on biomass as a substitute energy source: Polygeneration influence and hydrogen rich gas formation via pyrolysis // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2023. – Vol. 175. – Art. no. 106221. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106221>

ДОЗОВАЯ НАГРУЗКА НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ВВЭР

Д.Г. Веретенников

*Томский политехнический университет,
ИЯТШ, ОЯТЦ, гр. ОАМЗИ*

Научный руководитель: С.В. Беденко, к.ф.-м.н., доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ

В реакторах ВВЭР используется топливо UO_2 , обогащенное до 3–5 % по U^{235} . Такое топливо обладает сравнительно низкой радиационной и термической стойкостью, что ограничивает эффективность работы реактора и снижает его безопасность.

Практическое применение получило уран-гадолиниевое топливо $UO_2 + 5–8 \text{ мас. \% } Gd_2O_3$. Ведутся исследования топлива с добавкой с AmO_2 , которую предлагается использовать как выгорающий поглотитель нейтронов [1]. Для длительной и эффективной работы реактора топливо легируют различными гомогенными соединениями и гетерогенными включениями. В качестве легирующих добавок также рассматриваются В, Ве, В, С, Mg, Al, Si, Hf, Er, Pa и др. Эти элементы улучшают радиационную и термическую стойкость топлива, его теплопроводность, теплофизические и нейтронно-физические параметры активной зоны. Например, теплопроводность топлива улучшается при добавлении в него различных соединений бериллия [2]. При внедрении добавок алюминия и кремния возрастает механическая прочность топливной таблетки UO_2 благодаря увеличению размеров зерна [3].

Тем не менее, не смотря на ряд преимуществ, некоторые из вышеперечисленных элементов являются целевыми для (α, n) -реакций и потому могут существенно осложнить радиационную обстановку на различных стадиях открытого и закрытого ядерно-топливного цикла. Используемое на практике уран-гадолиниевое топливо имеет сниженное значение теплопро-