

Секция 6

Энергосбережение и энергоэффективность

СВЧ-ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ В ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИЙ ГАЗ: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗА СЧЕТ ДОБАВЛЕНИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

И. Калинин¹, Р.Б. Табакаев²

¹ Томский политехнический университет. ИЯТШ,

² Тюменский государственный университет. Х-БИО

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

В последние годы в связи с опасениями, связанными с загрязнением окружающей среды и растущим дефицитом энергии, особое внимание уделяется вопросу рационального использования природных ресурсов. Одним из наиболее актуальных материалов в рамках данной концепции является древесина. В первую очередь это связано с большими запасами древесины на территории России. По информации открытых источников площадь лесов России составляет 20–25 % от общемировых, при этом доля древесных отходов, образующихся в процессе лесозаготовки и деревообработки, в среднем составляет от 32 до 75 % от общего объема перерабатываемой древесины [1, 2]. Как правило, эти отходы накапливаются в отвалах без использования заложенного в них энергетического потенциала. Вследствие этого поиск путей переработки древесных отходов является актуальной задачей. Одним из возможных путей переработки таких отходов является термическое разложение с получением высококалорийных жидких [3] и газообразных продуктов [4].

Термическая СВЧ-переработка твердых органических топлив на сегодняшний день рассматривается как один из возможных путей преобразования отходов в полезные продукты. Несмотря на то, что данная технология находится на стадии разработки, выделяют ряд преимуществ нагрева материалов в электромагнитном поле СВЧ-диапазона. Зачастую к ним относят высокую удельную производительность и высокую энергетическую эффективность процесса [5]. Помимо этого, можно отметить экологичность процесса СВЧ-пиролиза, поскольку такой нагрев не требует специального нагревательного элемента, а само излучение распространяется в закрытых камерах, что позволяет минимизировать выброс вредных газов в атмосферу, снизить загрязнение нагреваемого материала и исключить образование вторичных отходов. Таким образом актуальным на сегодняшний день является расширение имеющихся знаний в области применения технологии и повышения эффективности СВЧ-пиролиза. В связи с этим целью настоящей работы является экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза древесных опилок и их смесей с микроволновыми поглотителями в виде разнодисперсных добавок на основе железа.

Экспериментальные результаты, представленные в данной работе, были получены на лабораторном стенде СВЧ-пиролиза (рис. 1), размещенном в НИЛ СВЧ-технологии ТПУ. Подробное описание данного стенда приведено в работе [6]. В качестве объекта исследования рассмотрены древесные отходы (сосновые опилки) (табл. 1), и их смеси с добавлением разнодисперсных металлических порошков на основе железа (доля добавок – 10 мас. %).

Таблица 1. Теплотехнические характеристики исходного сырья

Сырье	Влажность, W^a , %	Зольность на сухую массу, A^d , %	Выход летучих веществ, V^{daf} , %	Низшая теплота сгорания, Q_i^r , МДж/кг	Элементный состав на сухую массу вещества, % мас.				
					C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S^{daf}	O^{daf}
Древесные опилки	7,2	0,9	83,6	17,1	51,9	6,1	0,1	0,0	41,9

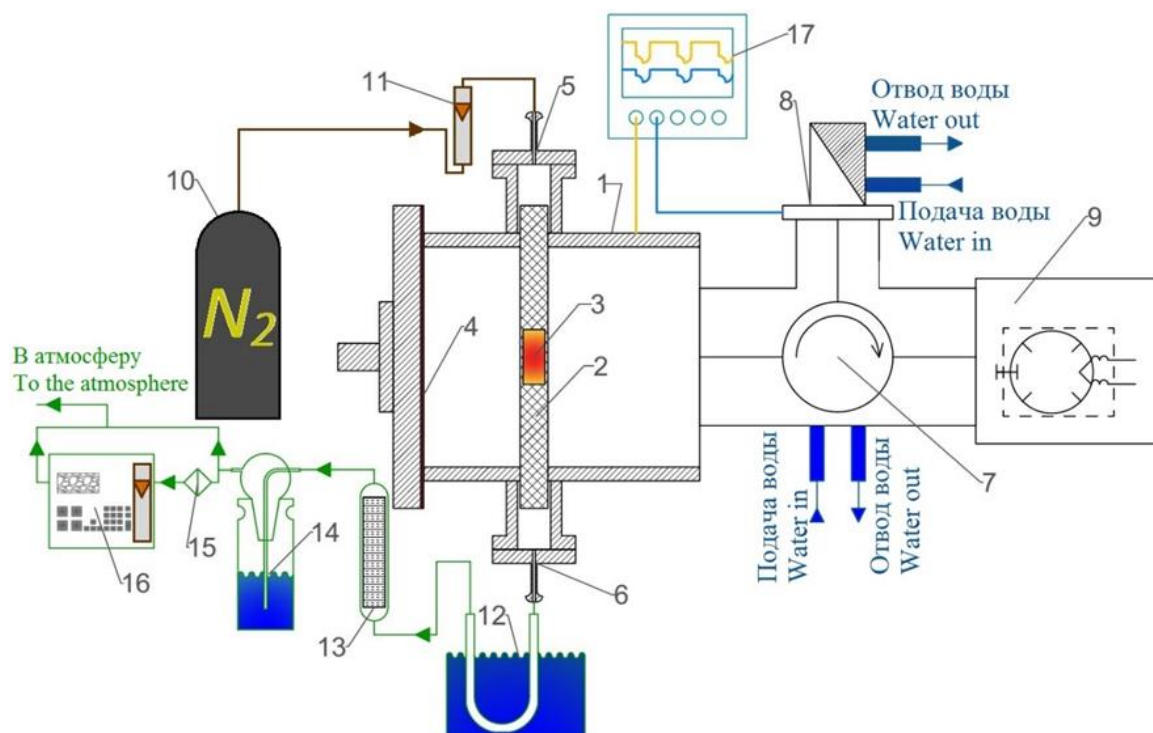


Рис. 1. Экспериментальный стенд СВЧ-пиролиза:

- 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

Для проведения эксперимента выполнена подготовка проб. С целью исключения влияния влажности материала на результат пробы предварительно выдерживали до воздушно-сухого состояния. Далее выполняли измельчение до фракции менее 0,5 мм и прессовку в цилиндрические пеллеты с массой 3 г и диаметром 12 мм. Для проведения экспериментальных исследований возможности повышения эффективности за счет добавления микроволновых поглотителей на основе железа после измельчения материал смешивался с добавкой в количестве 10 % от общей массы образца. Полученные образцы помещали внутрь реактора в центр кварцевой трубки, что обеспечивало одинаковые условия для каждого эксперимента. Источником СВЧ-излучения являлся магнетронный генератор с частотой 2,45 ГГц и номинальной

мощностью 850 Вт. В результате взаимодействия исследуемого материала с электромагнитным излучением происходил нагрев образца, что приводило к термической деструкции вещества с выделением пирогенетической воды, газообразных продуктов и смол. Полученные летучие продукты удалялись из реактора через штуцер отвода газа за счет продувки азотом (расход 1 л/мин) и направлялись в систему очистки, где происходило осаждение паров смолопродуктов. Газообразные продукты поступали в газоанализатор Тест-1 (Бонэр, Россия) для определения состава генерируемого пиролизного газа. Исходя из компонентного состава согласно рекомендациям [7] рассчитывали теплоту сгорания газа. После извлечения из реактора твердый углеродистый остаток взвешивали для составления материального баланса. Для обеспечения сходимости результатов каждый эксперимент повторяли не менее 3 раз.

Результаты СВЧ-переработки исходных древесных опилок (рис. 2, табл. 2) показали, что в процессе пиролиза образуется 14,6 % твердого углеродистого остатка, остальная часть переходит в летучие продукты (газ и пары пирогенетической воды). Основными компонентами генерируемого при этом газа является метан (43,7 об. %) и монооксид углерода (36,8 об. %). Однако стоит отметить довольно высокую для пиролитической переработки долю водорода – 18,2 об. %.

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

Материал добавки	Выход твердого остатка, %	Время инициации, с	Длительность, с	Теплота сгорания, МДж/м ³
Без добавок	14,6	>600	144	22,3
Нанопорошок железа	15,9	63	81	17,6
Микropopopoшok жeлeзa	14,3	66	88	20,1
Микropopopoшok Fe ₂ O ₃	10,5	56	91	15,3

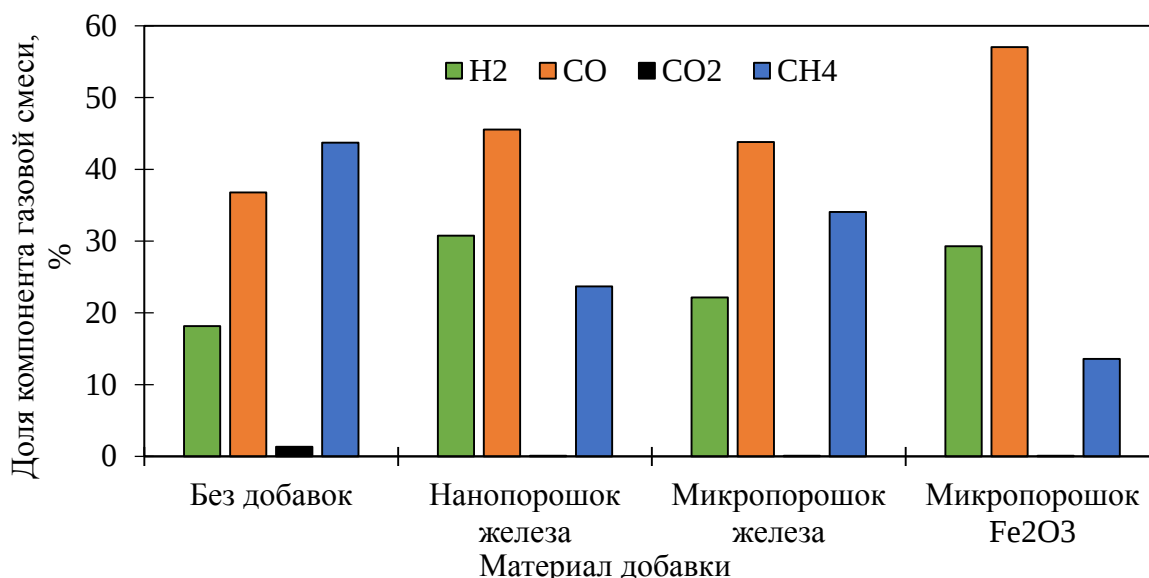
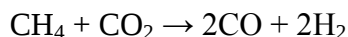
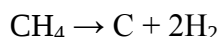


Рис. 2. Состав генерируемого газа, полученного в процессе СВЧ-пиролиза исходных опилок и при добавлении разноразмерных микроволновых поглотителей на основе железа

Использование добавок на основе железа (разноразмерные порошки железа и Fe₂O₃), в количестве 10 % от общей массы образца позволило снизить время инициации процесса практически в 10 раз, при этом сократилась и длительность протекания процесса (в 1,6–1,7 раз). Временные показатели протекания процесса очень важны, поскольку в процессе СВЧ-пиролиза энергия затрачивается только на работу магнетрона, затраты энергии сокращаются пропор-

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 CO₂-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. 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. Лебедев Ю.А., Шахатов В.А. Разложение CO₂ 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^{1,2}, К.Т. Ибраева¹

¹ Тюменский государственный университет

² 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-