

УДК 662.6; 662.7
DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4811
Шифр специальности ВАК: 2.4.6

Влияние выхода жидких продуктов на длительность процесса СВЧ-пиролиза

И.К. Калинич^{1✉}, А.В. Астафьев², А.В. Мостовщиков^{3,4}, Р.Б. Табакаев^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Тюменский государственный университет, Россия, г. Тюмень

³ Томский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, г. Томск

⁴ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, г. Томск

✉ ikk5@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности энергетического использования ископаемых топлив и возобновляемых ресурсов биомассы за счет их термического облагораживания. *Цель:* установление взаимосвязи между выходом жидких продуктов СВЧ-пиролиза органического сырья с различной степенью метаморфизма и продолжительностью протекания процесса. *Методы:* аттестованные методики ГОСТ для определения теплотехнических характеристик и элементного состава органической и минеральной частей органического сырья, метод «передачи–отражения» для измерения мнимой (ϵ') и действительной (ϵ'') составляющих комплексной диэлектрической проницаемости, физический эксперимент, газовый анализ, высокоскоростная видеосъемка. *Результаты.* На основе анализа материального баланса и длительности СВЧ-пиролиза различных видов органического сырья выдвинуто предположение, что разрушение сложных органических соединений приводит к образованию на поверхности образца углеродных частиц, обладающих высокими, относительно исходного сырья, электропроводными свойствами. При наличии большого числа таких частиц в СВЧ-поле могут возникнуть межчастичные электрические разряды, распространяющиеся вдоль образца, в результате чего наблюдается увеличение скорости нагрева. Для сырья с большим выходом жидких продуктов растет и количество углеродных частиц, что приводит к увеличению числа разрядов между такими центрами и соразмерному ускорению разогрева материала. Экспериментально показано и теоретически обосновано, что длительность СВЧ-пиролиза органического сырья напрямую зависит от скорости разогрева материала: вследствие увеличения выхода жидких продуктов и последующего увеличения концентрации углеродных центров снижается длительность протекания СВЧ-пиролиза. Полученные результаты могут быть использованы при оценке эффективности СВЧ-пиролиза органического сырья или топливных композиций, состоящих из материалов с различным выходом жидких продуктов.

Ключевые слова: СВЧ-пиролиз, органическое сырье, материальный баланс, выход жидких продуктов, длительность процесса

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-19-00410 «Разработка научных основ технологии получения продуктов СВЧ-пиролиза из био-угольных композиций». Аналитические измерения характеристик исходного сырья проведены в рамках Госзадания № FEWZ-2024-0013 «Научно-технические основы и прикладные решения ресурсоэффективной термической переработки органического сырья с получением продуктов с высокой добавленной стоимостью для энергетической, металлургической и сельскохозяйственной отраслей».

Для цитирования: Влияние выхода жидких продуктов на длительность процесса СВЧ-пиролиза / И.К. Калинич, А.В. Астафьев, А.В. Мостовщиков, Р.Б. Табакаев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 12. – С. 149–160. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4811

UDC 662.6; 662.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4811

Effect of the yield of liquid products on microwave pyrolysis duration

I.K. Kalinich¹✉, A.V. Astafev², A.V. Mostovshchikov^{3,4}, R.B. Tabakaev^{1,2}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation

³ Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russian Federation

⁴ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

✉ikk5@tpu.ru

Abstract. Relevance. The need to improve the efficiency of energy use of fossil fuels and renewable biomass resources through their thermal upgrading. **Aim.** To establish the relationship between the yield of liquid products of microwave pyrolysis of organic raw materials with different degrees of metamorphism and the process duration. **Methods.** Certified SS methods for determining the thermal characteristics and elemental composition of the organic and mineral parts of organic raw materials, the “transmission–reflection” method for measuring the imaginary (ϵ'') and real (ϵ') components of the complex dielectric constant, physical experiment, gas analysis, high-speed video filming. **Results.** Based on the analysis of the material balance and duration of the microwave pyrolysis of various types of organic raw materials, the authors have supposed that the destruction of complex organic compounds leads to the formation of carbon particles on the surface of the sample. These particles have high electrically conductive properties relative to the original raw materials. In the presence of a large number of such particles in the microwave field, interparticle electrical discharges can occur, spreading along the sample, resulting in an increase in the heating rate. For raw materials with a higher yield of liquid products, the number of carbon particles also increases. This leads to an increase in the number of discharges between such centers and a proportionate acceleration of material heating. It was experimentally shown and theoretically substantiated that the duration of the microwave pyrolysis of organic raw materials directly depends on material heating rate: due to an increase in the yield of liquid products and a subsequent increase in the concentration of carbon centers, the duration of the microwave pyrolysis process decreases. The results obtained can be used to evaluate the efficiency of microwave pyrolysis of organic raw materials or fuel compositions consisting of materials with different yields of liquid products.

Keywords: microwave pyrolysis, organic raw materials, material balance, yield of liquid products, process duration

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation project no. 22-19-00410 «Development of scientific and technical fundamentals for the technology of microwave pyrolysis products from bio-coal compositions». Analytical measurements of the characteristics of the raw materials were carried out within the framework of the State Assignment no. FEWZ-2024-0013 «Scientific and technical foundations and applied solutions for resource-efficient thermal processing of organic raw materials to obtain products with high added value for the energy, metallurgical and agricultural industries».

For citation: Kalinich I.K., Astafev A.V., Mostovshchikov A.V., Tabakaev R.B. Effect of the yield of liquid products on microwave pyrolysis duration. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 12, pp. 149–160. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4811

Введение

Современное мировое сообщество стоит перед серьезными экологическими вызовами, связанными с истощением ископаемых энергетических ресурсов и возрастающим загрязнением окружающей среды от их использования [1–3]. В этом контексте возобновляемые источники энергии (ВИЭ) приобретают всё большую актуальность и значимость для энергетической отрасли. Согласно совместному отчету Всемирной метеорологической организации и Международного агентства по возобновляемым источникам энергии, в 2023 г. доля ВИЭ в мировом энергетическом балансе достигла примерно 30 %

[4]. При этом отмечается [5–7], что среди ВИЭ наиболее перспективным являются вторичные ресурсы различных видов биомассы.

Одной из актуальных задач научного сообщества является поиск и обоснование технологий, позволяющих снизить вредные выбросы при энергетическом использовании как традиционного твердого ископаемого сырья, так и биоресурсов. Термическая переработка рассматривается как один из наиболее эффективных подходов для достижения этой цели. Обширным количеством преимуществ, среди которых хорошая управляемость, масштабируемость и замкнутый цикл процесса,

обладает пиролиз [8]. Методом пиролитической переработки могут быть утилизированы различные виды органического сырья [9–11] с получением ценных твердых, жидких и газообразных продуктов [12–14]. Дополнительным преимуществом при этом является тот факт, что твердые продукты пиролиза используются для секвестрации углерода, что способствует смягчению последствий изменения климата [15–17]. Таким образом, внедрение технологии пиролиза для переработки сырья позволит снизить удельные выбросы при транспортировке и использовании получаемых продуктов.

Одним из быстро развивающихся и перспективных направлений термпереработки является микроволновый пиролиз [18, 19] благодаря многочисленным преимуществам применения СВЧ-излучения. Наиболее значимыми из них являются меньшие временные и энергетические затраты по сравнению с другими видами термической переработки [20]. Данный факт связан с тем, что при СВЧ-пиролизе отсутствует прямой контакт между источником нагрева и перерабатываемым сырьем – волны проникают внутрь и тем самым способствуют инициации процесса изнутри материала [21]. При этом тепловая энергия распространяется от внутренней части образца к внешней. Это позволяет сохранять относительно низкую температуру окружающей сырье среды, что повышает безопасность процесса и сокращает время, необходимое для охлаждения реактора. Кроме того, использование СВЧ-излучения способствует равномерному выделению тепла по всему объему сырья и, как следствие, однородности его переработки [22]. Более того, образующиеся газообразные продукты практически не содержат в себе балластного компонента CO_2 [23], что обеспечивает более высокую калорийность по сравнению с газообразными продуктами, полученными при обычном пиролизе, а также меньшую экологическую нагрузку при их использовании.

Эффективность СВЧ-пиролиза зависит от ряда факторов, включая характеристики исходного сырья (фракция, влажность, элементный состав), а также параметры процесса, например, температуру и мощность излучения [22]. При варьировании этих параметров изменяется количественный выход жидких продуктов, что влияет на продолжительность процесса. В частности, было установлено, что уменьшение продолжительности СВЧ-пиролиза рисовой соломы позволяет увеличить выход жидких продуктов [24]. Исследование [25] посвящено изучению комплекса параметров (в том числе времени переработки) микроволнового пиролиза кукурузной соломы на распределение продуктов. Аналогичные исследования проведены в работе [26] применительно к СВЧ-пиролизу осадков

сточных вод и отходам производства кофе. Rui Zhou и др. [27] сделали вывод о том, что при уменьшении продолжительности СВЧ-пиролиза просо в 2 раза и уменьшении фракции сырья при одинаковой температуре процесса выход жидких продуктов увеличивается на 8 %.

Стоит подчеркнуть, что на данный момент отсутствует систематизация знаний и количественное обоснование в области влияния распределения продуктов СВЧ-пиролиза топлив с различным составом и характеристиками на длительность их переработки. На основании этого целью работы является установление взаимосвязи между выходом жидких продуктов СВЧ-пиролиза органического сырья с различной степенью метаморфизма и продолжительностью протекания процесса.

Объекты и методика исследования

Объект исследования

Исследуемое сырье представлено топливами, находящимися на разной стадии метаморфизма. В качестве растительной биомассы, рассматриваемой как наиболее «молодой» вид топлива, выбраны сосновые опилки, пшеничные отруби и солома, а также скорлупа кедрового ореха. Как претерпевшее структурные изменения сырье проанализированы биомасса животного происхождения (навоз крупнорогатого скота) и низинный торф (месторождение Суховское, Томская область). В качестве топлив более поздней степени метаморфизма изучены бурый уголь (месторождение Таловское, Томская область) и каменный уголь (марка Д, Кузнецкий бассейн, Кузбасс). Рассмотрение столь разнообразного по составу, характеристикам и геологическому возрасту сырья должно способствовать получению объективных результатов исследования.

Теплотехнические характеристики и элементный состав

Определение теплотехнических характеристик и элементного состава (содержание элементов органической части С, Н, N, S, O) исследуемого сырья проводили стандартными методами: зольность (A^d) – ГОСТ Р 55661-2013; выход летучих веществ (V^{daf}) – ГОСТ Р 55660-2013. Общую и аналитическую влагу определяли с использованием анализатора влажности Элвис-2С (ЭЛИЗА, Россия). Значения низшей теплоты сгорания (Q_i^l) измеряли на калориметре АБК-1В (РЭТ, Россия) согласно ГОСТ 147-2013. Элементный состав устанавливали при помощи анализатора Vario Unicube (Elementar, Германия). Перед каждым измерением работоспособность прибора проверяли на стандартном образце *sulfanilamide* (паспортный состав: С=41,68 %; Н=4,04 %; N=8,05 %; S=18,47 %). Содержание кислорода (мас. %) определяли по остатку по формуле (1):

$$O^d = 100 - C^d - H^d - N^d - S^d - A^d, \% \quad (1)$$

где C^d , H^d , N^d , S^d – содержание углерода, водорода, азота и серы в высушенном топливе, %; A^d – зольность топлива в пересчете на его сухую массу, %.

Измерение диэлектрических характеристик

Измерение диэлектрических характеристик образца осуществляли методом «передачи–отражения», описанным в работе [28]. Данная методика характеризуется тем, что отсутствует необходимость определения положения образца внутри коаксиальной воздушной линии в процессе исследований. Для измерений использован векторный сетевой анализатор Р4М-18 (Микран, Россия), который предварительно калибровали. Затем тороидальный образец помещали между внутренним и внешним проводниками воздушной линии, и осуществляли измерение характеристик «передачи» и «отражения». Измерения проводили при комнатной температуре в диапазоне частот от 1 до 11 ГГц. Частотный диапазон менее 1 ГГц не исследовали, так как при данном методе наблюдается высокая погрешность измерений, а на частотах выше 11 ГГц – большое влияние объемных резонансов, связанное с размерами исследуемого образца. На основе результатов измерения рассчитывали величины мнимой (ϵ'') и действительной (ϵ') составляющих комплексной диэлектрической проницаемости для каждой из частот излучения рассматриваемого диапазона. Далее по формуле (2) рассчитывали величину тангенса диэлектрических потерь ($\text{tg}(\delta)$), характеризующего величину мощности, поглощаемой образцом:

$$\text{tg}(\delta) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}. \quad (2)$$

СВЧ-пиролиз

Эксперименты проведены на лабораторном комплексе для СВЧ-переработки органических материалов, принципиальная схема которого представлена на рис. 1. Подробно методика подготовки образцов и проведения эксперимента на данном лабораторном комплексе описана в работе [29]. Принципиально эксперимент состоял в следующем. Предварительно из каждого вида рассматриваемого сырья изготавливали образец – 3 в виде гранулы (диаметр 12 мм, масса 3,0 г с допустимым отклонением $\pm 0,1$ г). Образец располагали по центру кварцевой трубки – 2 реакционной камеры – 1, после чего при помощи системы подачи азота, состоящей из баллона, редуктора и ротаметра (на рисунке не показаны), осуществляли продувку азотом всего объема лабораторного комплекса в течение не менее 5 минут. Необходимо отметить, что продувка азотом осуществлялась на протяжении всего эксперимента (расход 0,5 л/мин.) с целью создания

избыточного давления в системе. При помощи магнетронного источника (мощность 800 Вт) генерировали СВЧ-излучение с частотой 2,45 ГГц, которое через циркулятор – 7 поступало в реакционную камеру – 1, где часть излучения поглощалась образцом. Не поглощенное образцом излучение перенаправлялось с помощью циркулятора – 7 в теплообменник – 8, где трансформировалось в теплоту и выводилось из системы.

В процессе поглощения СВЧ-излучения образцом происходила его термическая деструкция, в результате которой исходное сырье разлагалось на твердый углеродистый остаток и летучие продукты пиролиза – пары смолы и подсмольной воды и газ. Летучие продукты пиролиза за счет продувки азотом транспортировались из реакционной камеры в систему фильтрации, где за счет конденсации и сорбции жидкая часть осаждалась. Газ направляли в окружающую среду, отбирая из него пробу на анализ при помощи газоанализатора «Тест-1» (расход 0,3 л/мин). Более подробно методика подготовки образцов и проведения эксперимента описана в работе [29].

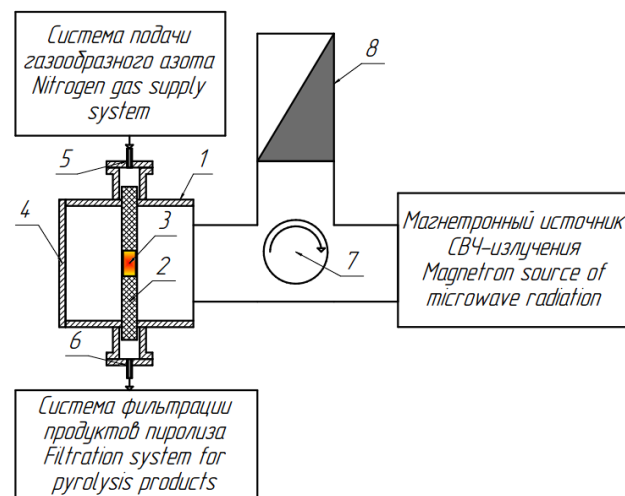


Рис. 1. Лабораторный комплекс для СВЧ-переработки органических материалов: 1 – реакционная камера, 2 – трубка из кварца (внутренний диаметр 14 мм), 3 – образец в виде цилиндрической гранулы, 4 – подвижная мембрана с механизмом регулировки, 5 – ввод азота в систему, 6 – отвод азота с летучими продуктами пиролиза, 7 – микроволновый циркулятор, 8 – теплообменник

Fig. 1. Laboratory setup for microwave processing of organic materials: 1 – reaction chamber, 2 – quartz tube (internal diameter 14 mm), 3 – sample in the form of a cylindrical granule, 4 – movable membrane with an adjustment mechanism, 5 – nitrogen injection into the system, 6 – nitrogen removal with volatile pyrolysis products, 7 – microwave circulator, 8 – heat exchanger

Визуализацию процесса осуществляли с использованием высокоскоростной видеокамеры FASTCAM Mini UX100 (Photron, Япония) с объективом AF-S MICRO NIKKOR 105 мм (Nikon, Япония), расположенной над реакционной камерой – 1 (на рис. 1 не показана). Видеофиксация процесса велась со скоростью 125 кадров в секунду.

Материальный баланс

Материальный баланс пиролиза составляли следующим образом. Определяли аналитическую влажность исходного сырья (W^a), взвешивали его массу (m_0). Осуществляли его СВЧ-переработку, получая твердый углеродистый остаток. Взвешивали массу полученного остатка (m_k). Выход углеродистого остатка устанавливали по следующей формуле (3):

$$\omega = \frac{m_k}{m_0 \cdot \left(\frac{100-W^a}{100}\right)} \cdot 100\% . \quad (3)$$

Для определения выхода жидких продуктов пиролиза (пирогенетической воды и смолы) определяли массу фильтров и соединительных шлангов из системы фильтрации продуктов пиролиза до и после процесса. Выход жидких продуктов рассчитывали по формуле (4):

$$\omega_l = \frac{m_f^1 - m_f^0}{m_0 \cdot \left(\frac{100-W^a}{100}\right)} \cdot 100\% , \quad (4)$$

где m_f^0 и m_f^1 – масса системы фильтрации до и после СВЧ-пиролиза соответственно.

Выход газообразных продуктов определяли по остатку по формуле (5):

$$\omega_g = 100\% - \omega - \omega_l . \quad (5)$$

Оценку погрешности измерений осуществляли согласно ГОСТ Р 8.736-2011 и РМГ 61-2010.

Результаты экспериментов и обсуждение Характеристики объектов и их описание

Исследуемые виды твердого органического сырья характеризуются высокой реакционной способностью ($V^{daf}=37,7-83,6\%$), что указывает на их термическую нестабильность и перспективу для термохимической переработки. При этом имеется довольно существенное различие по величине зольности, которое позволяет классифицировать топлива на три группы [30]: низзолные (менее 4,9 %) – скорлупа, опилки и солома, среднезолные (4,9–19,8 %) – отруби, каменный уголь и навоз крупнорогатого скота, высокозолные (свыше 19,8 %) – торф и бурый уголь. Низшая теплота сгорания растительной биомассы (скорлупы, опилок, соломы и отрубей) находится в диапазоне от 16,05 до 17,96 МДж/кг, отходов животноводства – 14,92 МДж/кг, торфа – 10,90 МДж/кг, бурого и каменного углей – 15,94 и 24,88 МДж/кг, соответственно. Столь низкие значения теплоты сгорания отходов животноводства, торфа и бурого угля обусловлены довольно высокими значениями зольности по сравнению с другими рассматриваемыми видами сырья.

Стоит отметить характерную тенденцию для топлив разной степени метаморфизма: содержание углерода увеличивается от «молодых» видов топлива (растительная биомасса, представленная скорлупой, опилками, отрубями и соломой) к «зрелым» (каменный уголь), а содержание водорода и кислорода снижается.

Таблица 1. Теплотехнические характеристики и элементный состав исследуемого сырья

Table 1. Thermal characteristics and elemental composition of the studied raw materials

Образец Sample	Влажность Humidity, W^a , %	Зольность на сухую массу Dry ash, A^d , %	Выход летучих веществ Volatile yield, V^{daf} , %	Низшая теплота сгорания, МДж/кг Low heat value Q_i^r , MJ/kg	Элементный состав на сухую беззольную массу Elemental composition on dry ash-free basis, %				
					C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S^{daf}	O^{daf}
Скорлупа/Nutshell	7,2±0,1	0,7±0,1	76,5±2,2	17,96±0,2	52,68±0,22	5,88±0,08	0,32±0,10	0,00±0,00	41,12±0,30
Опилки/Sawdust	7,2±0,1	0,9±0,1	83,6±2,4	17,12±0,2	51,89±0,04	6,08±0,06	0,05±0,05	0,00±0,00	41,98±0,03
Солома/Straw	7,5±0,1	3,9±0,3	78,2±2,2	17,38±0,2	51,96±0,66	6,01±0,07	1,13±0,24	0,04±0,05	40,85±0,65
Пшеничные отруби Wheat bran	8,5±0,1	5,7±0,4	81,8±2,3	16,05±0,2	48,94±0,08	6,56±0,12	2,94±0,11	0,14±0,01	41,42±0,22
Навоз/Manure	9,0±0,1	15,6±1,1	75,2±2,1	14,92±0,2	53,38±0,57	5,90±0,08	2,69±0,19	0,23±0,06	37,80±0,47
Торф/Peat*	9,6±0,4	25,7±0,2	66,8±2,1	10,90±0,2	52,06±0,16	6,31±0,07	3,58±0,06	0,20±0,07	37,85±0,18
Бурый уголь/Brown coal	8,9±0,1	22,6±0,5	59,2±2,1	15,94±0,2	63,95±1,67	5,23±0,22	0,62±1,45	0,75±0,12	29,44±1,82
Каменный уголь Hard coal	10,6±0,1	8,3±0,2	37,7±1,1	24,88±0,2	80,70±2,21	4,48±0,20	2,45±0,09	0,49±0,12	11,88±2,35

Примечание/Note: * – данные представлены с учётом содержания диоксида углерода карбонатов/data are presented taking into account the content of carbon dioxide carbonates (CO_2)^d=9,8 %.

Величина мощности, поглощаемой материалом и преобразуемой в теплоту, характеризуется тангенсом угла диэлектрических потерь [31]: с ростом данной величины увеличивается скорость нагрева образца. Таким образом используемая частота СВЧ-излучения должна обеспечивать высокое значение тангенса для всех исследуемых материалов, что позволит организовать максимальную эффективность термической переработки. Из рис. 2 видно, что тангенс угла диэлектрических потерь на различных частотах излучения меняется, при этом наибольшие его значения отмечены в диапазоне от 1 до 5 ГГц. Учитывая, что Федеральная комиссия по связи (Federal Communications Commission – FCC) в рассматриваемом частотном диапазоне зарезервировала 2,45 ГГц для использования в промышленных, научных и медицинских целях [22], СВЧ-переработка рассматриваемых материалов будет осуществляться при данном значении частоты магнетрона.

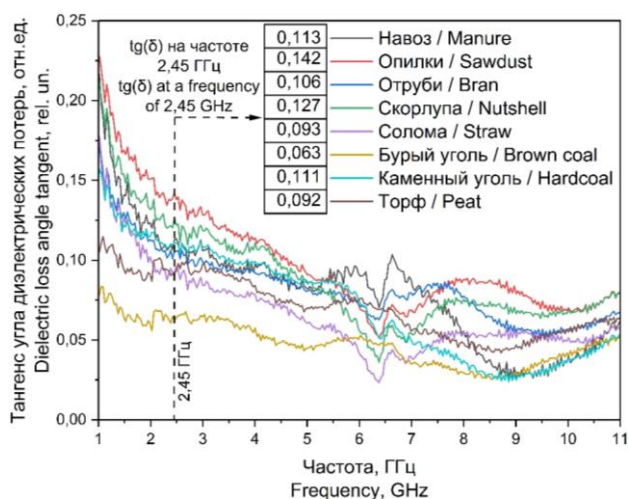


Рис. 2. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь ($tg(\delta)$) от частоты излучения
Fig. 2. Dependence of the dielectric loss angle tangent ($tg(\delta)$) on the radiation frequency

На рис. 2 отдельно выделены значения тангенса угла диэлектрических потерь для всех исследуемых в работе материалов на частоте 2,45 ГГц. Погрешность определения мнимой (ϵ'') и действительной (ϵ') компонент диэлектрической проницаемости, используемых для расчета тангенса угла диэлек-

трических потерь ($tg(\delta) = \epsilon''/\epsilon'$), описана в [32] и составляет не менее 0,009 отн. ед. для $\Delta\epsilon'$ и не менее 0,0017 отн. ед. для $\Delta\epsilon''$. На основе этих значений рассчитана абсолютная погрешность косвенных измерений для частоты 2,45 ГГц для исследуемых твердых органических топлив

$$\Delta tg(\delta) = (39 \div 79) \cdot 10^{-5} \text{ отн. ед.}$$

СВЧ-пиролиз органических топлив

Результаты составления материального баланса (рис. 3) показывают, что с ростом степени метаморфизма органического сырья (растительная биомасса → уголь) при пиролизной переработке увеличивается выход твердого остатка, в свою очередь, выход «летучих» продуктов (жидкости и газа) уменьшается. При этом можно заметить, что величина выхода твердого остатка ниже, чем при способах термической переработки в неподвижном слое [33]. Это можно объяснить тем, что при СВЧ-воздействии на сырьё происходит его равномерный нагрев с высокой скоростью (рис. 4), в результате чего «летучие» продукты взаимодействуют с твердым углеродистым остатком, образуя большее количество газообразных продуктов. Примером такого взаимодействия является реакция:

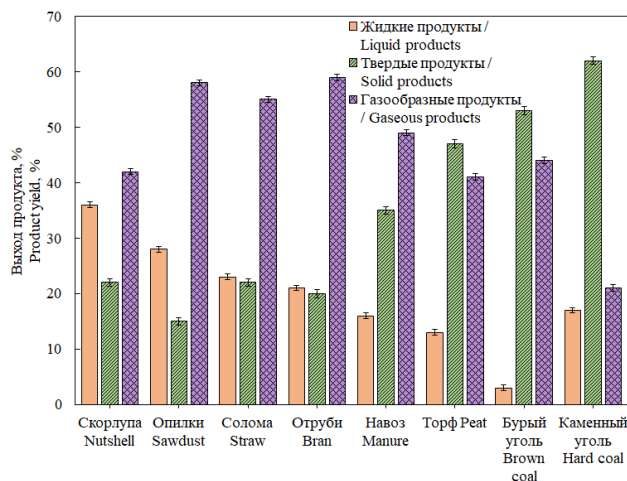
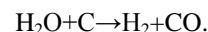


Рис. 3. Материальный баланс СВЧ-пиролиза органического сырья разной степени метаморфизма
Fig. 3. Material balance of microwave pyrolysis of organic raw materials of varying degrees of metamorphism

Таблица 2. Длительность процесса СВЧ-пиролиза

Table 2. Microwave pyrolysis duration

Сырье Raw material	Скорлупа Nutshell	Опилки Sawdust	Солома Straw	Отруби Bran	Навоз Manure	Торф Peat	Бурый уголь Brown coal	Каменный уголь Hard coal
Длительность процесса, с Process duration, s	92,2±6,3	130,0±9,6	94,8±7,6	124,0±12,1	136,0±9,7	189,0±13,6	354,0±35,6	185,0±13,9

Определена длительность протекания СВЧ-пиролиза для переработанных образцов органического сырья (табл. 2). Определение осуществляли на основе результатов газового анализа, как временной интервал от начала индикации выхода газов до момента, когда их выход прекратился.

Связь выхода жидких продуктов и длительности процесса

Электрофизические характеристики органического сырья изменяются в процессе пиролиза, как вследствие повышения температуры, так и по причине изменения его органического состава: переход части элементов органической составляющей топлива в жидкие и газообразные продукты. При анализе полученных данных (рис. 3, табл. 2) построена зависимость (рис. 4), связывающая длительность СВЧ-пиролиза органического сырья и величину выхода жидких продуктов в процессе его протекания. Видно (рис. 4), что с увеличением выхода жидких продуктов снижается длительность протекания СВЧ-пиролиза сырья. Согласно литературным источникам [34, 35] в составе смолопродуктов присутствует обилие химических соединений углеводородных групп, которые в результате термической деструкции могут частично или полностью переходить в твердый углерод [36–38] и иные соединения, обладающие высоким, относительно исходного сырья, значением тангенса угла диэлектрических потерь. В работах [39, 40] авторами представлены результаты разложения органических соединений в газовых и жидких средах в плазме СВЧ-разряда, которые показывают наличие аморфного углерода и углеродных нанотрубок в числе получаемых продуктов. В дополнение к этому в работе [41] показано, что при взаимодействии органических веществ с СВЧ-плазмой преимущественно наблюдаются окислительно-восстановительные реакции, в результате которых происходит разрушение сложных органических соединений с образованием новых, более простых соединений.

Полученная зависимость (рис. 4) может быть описана следующим уравнением (при следующих условиях протекания процесса: частота магнетрона 2,45 ГГц, мощность 800 Вт):

$$\tau(\omega_l) = -0,01\omega_l^3 + 0,98\omega_l^2 - 30,55\omega_l + 439,21,$$

где τ – длительность СВЧ-пиролиза, с; ω_l – выход жидких продуктов в процессе СВЧ-пиролиза, %.

Основываясь на данных зависимости, можно предположить, что при достижении температуры начала термической деструкции появившиеся жидкие продукты перемещаются из центральных областей образца к его внешним границам. При этом происходит их разложение с образованием мелкодисперсных углеродных частиц. Накопление этих

частиц в приповерхностном слое также является фактором интенсификации нагрева образца.

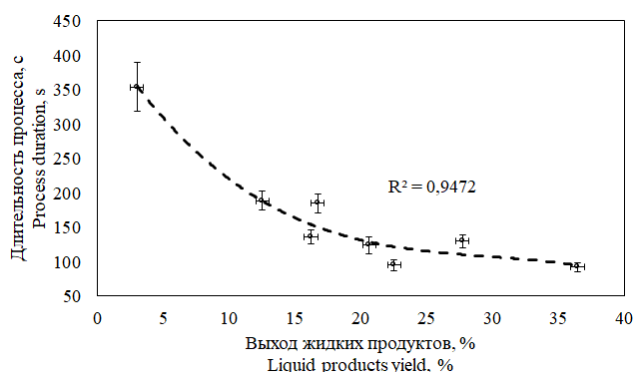


Рис. 4. Связь между длительностью протекания СВЧ-пиролиза органического сырья и выходом жидких продуктов

Fig. 4. Relationship between the microwave pyrolysis duration of organic raw materials and the yield of liquid products

В работе [42] авторами показано, что электропроводные свойства углерода могут меняться в широком диапазоне. К тому же некоторые углеродные структуры могут обладать свойствами металлов [43]. Как описано в работе [44], при наличии центров с металлическими или полупроводниковыми свойствами в сырье, находящемся в СВЧ-поле, могут возникать межчастичные электрические разряды, распространяющиеся вдоль образца (рис. 5).

Распространение разряда приводит к равномерному нагреву всего образца с иницированием его пиролиза в разрядных каналах и вблизи частиц примеси. Следовательно, поскольку с увеличением выхода смолопродуктов растет и число углеродных частиц на поверхности образца, возможно возникновение разряда между такими вкраплениями. С ростом числа разрядов увеличивается скорость нагрева материала, а длительность СВЧ-пиролиза снижается, поскольку на достижение высоких температур затрачивается меньше времени.

Заключение

Проведен анализ материального баланса и длительности СВЧ-пиролиза различных видов органического сырья. Выдвинуто предположение, что разрушение сложных органических соединений приводит к образованию на поверхности образца углеродных частиц, обладающих высокими, относительно исходного сырья, электропроводными свойствами. При наличии большого числа таких частиц в СВЧ-поле могут возникать межчастичные электрические разряды, распространяющиеся вдоль образца, в результате чего наблюдается увеличение скорости нагрева.

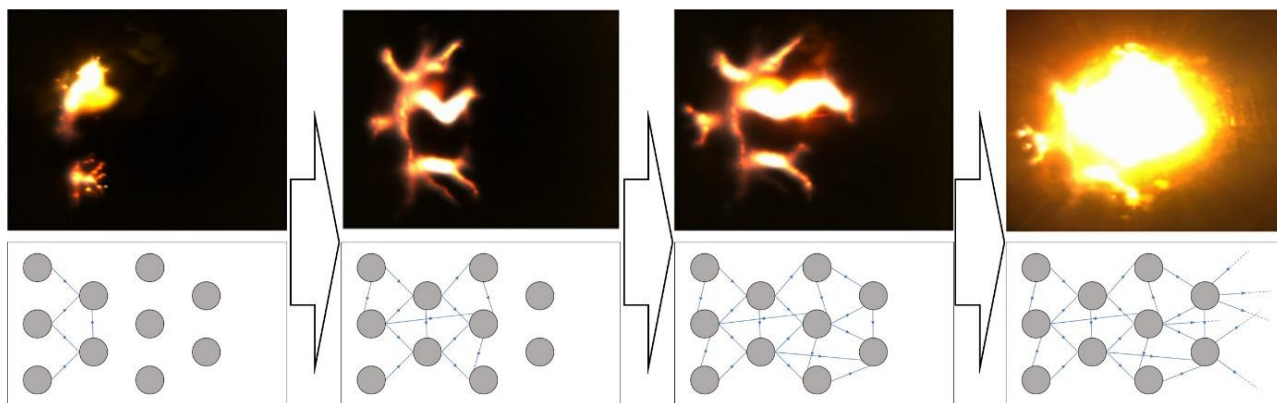


Рис. 5. Фотограмма и схема распространения электрического разряда в сырье с включениями металлических частиц

Fig. 5. Photogram and diagram of electric discharge propagation in raw materials with inclusions of metal particles

Для сырья с большим выходом жидких продуктов растёт и количество углеродных частиц, что приводит к увеличению числа разрядов между такими центрами и соразмерному ускорению разогрева материала. Экспериментально показано и теоретически обосновано, что длительность СВЧ-пиролиза органического сырья напрямую зависит от скорости разогрева материала: вследствие уве-

личения выхода жидких продуктов и последующего увеличения концентрации углеродных центров снижается длительность протекания СВЧ-пиролиза. Полученные результаты могут быть использованы при оценке эффективности СВЧ-пиролиза органического сырья или топливных композиций, состоящих из материалов с различным выходом жидких продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang J., Azam W. Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries // *Geoscience Frontiers*. – 2024. – Vol. 15. – № 2. – P. 101757. DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101757.
2. Van Asselt H., Green F. COP26 and the dynamics of anti-fossil fuel norms // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. – 2023. – Vol. 14. – № 3. – P. 1–12. DOI: 10.1002/wcc.816.
3. Kolawole A.S., Iyiola A.O. Environmental pollution: threats, impact on biodiversity, and protection strategies // *Sustainable utilization and conservation of Africa's biological resources and environment* / Eds. S.C. Izah, M.C. Ogwu – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – P. 377–409.
4. 2022 year in review: climate-driven global renewable energy potential resources and energy demand / World Meteorological Organization (WMO); International Renewable Energy Agency (IRENA). – Geneva, 2023. – 40 p. URL: <https://library.wmo.int/records/item/68576-2022-year-in-review-climate-driven-global-renewable-energy-potential-resources-and-energy-demand> (дата обращения 19.07.2024).
5. Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: challenges and perspectives / L. Zhao, Z.-F. Sun, C. Zhang, J. Nan, N. Ren, D.-J. Lee, C. Chen // *Bioresource Technology*. – 2022. – Vol. 343. – P. 126123. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126123.
6. Recovery processes of sustainable energy using different biomass and wastes / S.S. Sival, Q. Zhang, N. Devi, A.K. Saini, V. Saini, B. Pareek, S. Gaidukovs, V.K. Thakur // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 150. – P. 111483. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111483.
7. Bio-oil and biochar from the pyrolytic conversion of biomass: a current and future perspective on the trade-off between economic, environmental, and technical indicators / A.K. Vuppaladadiyam, S.S.V. Vuppaladadiyam, A. Sahoo, S. Murugavelh, E. Anthony, T. Bhashkar, Y. Zheng, M. Zhao, H. Duan, Y. Zhao, E. Antunes, A.K. Sarmah, S.Y. Leu // *Science of The Total Environment*. – 2023. – Vol. 857. – P. 159155. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159155.
8. Пиролиз как современный метод получения альтернативных источников энергии / А.В. Тихонов, М.Г. Сульман, Ю.Ю. Косивцов, Ю.В. Луговой // *Вестник Тверского государственного университета*. – 2015. – № 2. – С. 45–51.
9. The course and the effects of agricultural biomass pyrolysis in the production of high-calorific biochar / P. Kazimierski, K. Januszewicz, W. Godlewski, A. Fijuk, T. Suchocki, P. Chaja, B. Barczak, D. Kardaś // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – № 3. – P. 1–18. DOI: 10.3390/ma15031038.
10. Biomass pyrolysis: past, present, and future / T.Y.A. Fahmy, Y. Fahmy, F. Mobarak, M. El-Sakhawy, R.E. Abou-Zeid // *Environment, Development and Sustainability*. – 2020. – Vol. 22. – P. 17–32. DOI: 10.1007/s10668-018-0200-5.
11. Li C.-Z. Some recent advances in the understanding of the pyrolysis and gasification behaviour of Victorian brown coal // *Fuel*. – 2007. – Vol. 86. – № 12–13. – P. 1664–1683. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.01.008.
12. Обзор развития и применения технологий пиролиза для переработки отходов / О.А. Мишустин, В.Ф. Желтобрюхов, Н.В. Грачева, С.Б. Хантимирова // *Молодой ученый*. – 2018. – № 45 (231). – С. 42–45.
13. Demirbas A. Combustion characteristics of different biomass fuels // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2004. – Vol. 30. – P. 219–230. DOI: 10.1016/j.peccs.2003.10.004.

14. Энерготехнологическое использование биомассы / И.И. Лиштван, В.М. Дударчик, В.М. Крайко, Е.В. Ануфриева, Е.А. Смолячкова // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. – 2017. – № 4. – С. 91–101.
15. Изменчивость полифенолоксидазной и пероксидазной активности агродерново-подзолистой почвы разной окультуренности с биоуглем / Е.Я. Рижия, Л.В. Бойцова, В.Е. Вертебный, J. Horak, М.А. Москвин, В.И. Дубовицкая, Ю.В. Хомяков // Сельскохозяйственная биология. – 2022. – Т. 57. – № 3. – С. 476–485. DOI: 10.15389/agrobiology.2022.3.476rus.
16. The influence of the biochar application on the CO₂ emission from Luvic Anthrosols in the south of Primorsky region (Russian Far East) / M.A. Bovsun, O.V. Nesterova, V.A. Semal, N.A. Sakara // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. – 2021. – Vol. 862. – № 1. – P. 012091. DOI: 10.1088/1755-1315/862/1/012091.
17. Recent advances in developing engineered biochar for CO₂ capture: an insight into the biochar modification approaches / A.N. Shafawi, A.R. Mohamed, P. Lahijani, M. Mohammadi // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 9. – № 6. – P. 106869. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106869.
18. Challenges and opportunities in the production of sustainable hydrogen from lignocellulosic biomass using microwave-assisted pyrolysis: a review / V. Sridevi, D.V. Surya, B.R. Reddy, M. Shah, R. Gautam, T.H. Kumar, H. Puppala, K.S. Pritam, T. Basak // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 52. – P. 507–531. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.186.
19. A review on analysis of biochar produced from microwave-assisted pyrolysis of agricultural waste biomass / R. Potnuri, D.V. Surya, C.S. Rao, A. Yadav, V. Sridevi, N. Remya // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2023. – P. 106094. DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106094.
20. Microwave-assisted pyrolysis technology for bioenergy recovery: mechanism, performance, and prospect / G. Su, H.C. Ong, M.Y. Cheah, W.H. Chen, S.S. Lam, Y. Huang // Fuel. – 2022. – Vol. 326. – P. 124983. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124983.
21. Gunich S.V., Yanchukovskaya E.V., Dneprovskaya N.I. Processing of sludge treatment facilities // Proceedings of Universities Applied Chemistry and Biotechnology. – 2017. – Vol. 7. – P. 184–188. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-1-183-187.
22. Microwave pyrolysis of coal, biomass and plastic waste: a review / A. Suresh, A. Alagusundaram, P.S. Kumar, D.-V.N. Vo, F.C. Christopher, B. Balaji, V. Viswanathan, S. Sankar // Environmental Chemistry Letters. – 2021. – Vol. 19. – P. 3609–3629. DOI: 10.1007/s10311-021-01245-4.
23. Киряева Т.А. Исследование состава углеметановых геоматериалов с помощью СВЧ-пиролиза каменного угля // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 2. – № 3. – С. 93–96.
24. Microwave irradiation pyrolysis of rice straw in ionic liquid ([Emim] Br) / S. Cheng, Z. Zhang, D. Zhang, Y. Deng // BioResources. – 2013. – Vol. 8. – № 3. – P. 3994–4003.
25. Lei H., Ren S., Julson J. The effects of reaction temperature and time and particle size of corn stover on microwave pyrolysis // Energy & Fuels. – 2009. – Vol. 23. – № 6. – P. 3254–3261.
26. 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. – № 2. – P. 316–322. DOI: 10.1016/j.jaap.2011.03.010.
27. Zhou R., Lei H., Julson J.L. Effects of reaction temperature, time and particle size on switchgrass microwave pyrolysis and reaction kinetics // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2013. – Vol. 6. – № 1. – P. 53–61.
28. Wideband reference-plane invariant method for measuring electromagnetic parameters of materials / K. Chalapat, K. Sarvala, J. Li, G.S. Paraoanu // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2009. – Vol. 57. – № 1. – P. 2257–2267. DOI: 10.1109/TMTT.2009.2027160.
29. 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.
30. Vassilev S.V., Vassileva C.G., Vassilev V.S. Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: an overview // Fuel. – 2015. – Vol. 158. – P. 330–350. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.05.050.
31. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Физматлит, 1963. – 403 с.
32. Baker-Jarvis J. Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements // NASA STI/Recon Technical Report N. – 1990. – Vol. 91. – P. 28482.
33. Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis / R. Tabakaev, K. Ibraeva, A. Astafev, Yu. Dubinin, N. Yazukov, A. Zavorin, V. Yakovlev // Fuel. – 2019. – Vol. 245. – P. 29–38. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.02.049.
34. Гайдабрус М.А. Исследование возможности каталитического снижения смолопродуктов в составе пиролизного газа из опилок // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы XII Международн. научно-практ. конф. – Кемерово: Куз. гос. техн. ун-т, 2023. – С. 515.1–515.7.
35. Хроматографическое определение химического состава тяжелых смол пиролиза / М.А. Лебедева, В.Д. Колесник, В.И. Машуков, А.В. Егоров // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 3. – С. 102–105.
36. Разложение ацетилена на водород и углерод: опыты с ДВС и эксперименты с проточным реактором / М.С. Власкин, В.М. Зайченко, П.В. Белов, А.В. Григоренко, А.И. Курбатова, А.В. Еремин, В.Е. Фортов // Теоретические основы химической технологии. – 2021. – Т. 55. – № 2. – С. 251–260. DOI: 10.31857/S0040357121020135.
37. Decomposition of hydrocarbons to hydrogen and carbon / S. Ahmed, A. Aitani, F. Rahman, A. Al-Dawood, F. Al-Muhaish // Applied Catalysis A: General. – 2009. – Vol. 359. – № 1-2. – P. 1–24. DOI: 10.1016/j.apcata.2009.02.038
38. Wal R.V., Nkiawete M.M. Carbons as catalysts in thermo-catalytic hydrocarbon decomposition: a review // C, Journal of Carbon Research. – 2020. – Vol. 6. – № 2. – P. 23. DOI: 10.3390/c6020023.
39. Деструкция органических соединений в газовой и жидкой средах в плазме СВЧ-разряда / А.Г. Жерлицын, В.П. Шиян, Л.Н. Шиян, С.О. Магомадова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 10. – С. 65–71.

40. Destruction of organic compounds in gaseous and liquid media in plasma microwave discharge / V.P. Shiyan, L.N. Shiyan, S.O. Magomadova, A.G. Zherlitsyn // 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST). IEEE. – 2016. – С. 345–349. DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884265.
41. Study of the mechanism of interaction of microwave plasma discharge with solutions of organic substances / L.N. Shiyan, A.G. Zherlitsyn, S.O. Magomadova, C.S. Lazar // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 685. – С. 657–661. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.657.
42. Термогазохимическая модификация технического углерода: структура и свойства / Ю.В. Сурувикин, А.Г. Шайтанов, И.В. Резанов, А.В. Сырцева // Технологическое горение: коллективная монография / под общ. ред. акад. С.М. Алдошина, чл.-корр. РАН М.И. Алымова. – 2018. – Т. 7. – С. 161–191. DOI: 10.31857/S9785907036383000007.
43. Feng M., Zhao J., Petek H. Atomlike, hollow-core-bound molecular orbitals of C60 // Science. – 2008. – Vol. 320. – № 5874. – P. 359–362. DOI: 10.1126/science.1155866.
44. Microwave pyrolysis of cattle manure: initiation mechanism and product characteristics / R. Tabakaev, I. Kalinich, A. Mostovshchikov, I. Dimitryuk, A. Asilbekov, K. Ibraeva, M. Gaidabrus, I. Shanenkov, M. Rudmin, N. Yazykov, S. Preis // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2023. – P. 1–12. DOI: 10.1007/s13399-023-04686-9.

Информация об авторах

Иван Константинович Калинин, ассистент отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; ikk5@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9597-7671>

Александр Владимирович Астафьев, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы института экологической и сельскохозяйственной биологии, Тюменский государственный университет, Россия, 625003, г. Тюмень ул. Володарского, 6; a.v.astafev@utmn.ru

Андрей Владимирович Мостовщиков, доктор технических наук, директор научно-исследовательского института строительных материалов, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; профессор кафедры физической электроники, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40; mostovshchikov@tsuab.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6401-9243>

Роман Борисович Табакаев, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; старший научный сотрудник лаборатории ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы института экологической и сельскохозяйственной биологии, Тюменский государственный университет, Россия, 625003, г. Тюмень ул. Володарского, 6; TabakaevRB@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3879-7353>

Поступила в редакцию: 20.08.2024

Поступила после рецензирования: 20.10.2024

Принята к публикации: 11.11.2024

REFERENCES

1. Wang J., Azam W. Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geoscience Frontiers*, 2024, vol. 15, no. 2, pp. 101757. DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101757.
2. Van Asselt H., Green F. COP26 and the dynamics of anti-fossil fuel norms. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2023, vol. 14, no. 3, pp. 1–12. DOI: 10.1002/wcc.816.
3. Kolawole A.S., Iyiola A.O. Environmental pollution: threats, impact on biodiversity, and protection strategies. *Sustainable utilization and conservation of Africa's biological resources and environment*. Eds. S. C. Izah, M. C. Ogwu. Singapore, Springer Nature Singapore, 2023. pp. 377–409.
4. 2022 year in review: climate-driven global renewable energy potential resources and energy demand. *World Meteorological Organization (WMO); International Renewable Energy Agency (IRENA)*, 2023. 40 p. Available at: <https://library.wmo.int/records/item/68576-2022-year-in-review-climate-driven-global-renewable-energy-potential-resources-and-energy-demand> (accessed 19 July 2024).
5. Zhao L., Sun Z.-F., Zhang C., Nan J., Ren N., Lee D.-J., Chen C. Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: challenges and perspectives. *Bioresour. Technol.*, 2022, vol. 343, pp. 126123. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126123.
6. Sival S.S., Zhang Q., Devi N., Saini A.K., Saini V., Pareek B., Gaidukovs S., Thakur V.K. Recovery processes of sustainable energy using different biomass and wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 150, pp. 111483. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111483.
7. Vuppaladadiyam A.K., Vuppaladadiyam S.S.V., Sahoo A., Murugavel S., Anthony E., Bhashkar T., Zheng Y., Zhao M., Duan H., Zhao Y., Antunes E., Sarmah A.K., Leu S.Y. Bio-oil and biochar from the pyrolytic conversion of biomass: a current and future perspective on the trade-off between economic, environmental, and technical indicators. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 857, pp. 159155. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159155.

8. Tikhonov A.V., Sulman M.G., Kosivtsov Yu.Yu., Lugovoy Yu.V. Pyrolysis as a contemporary method for alternative energy sources. *Herald of Tver state university*, 2015, no. 4, pp. 45–51. (In Russ.)
9. Kazimierski P., Januszewicz K., Godlewski W., Fijuk A., Suchocki T., Chaja P., Barczak B., Kardaś D. The course and the effects of agricultural biomass pyrolysis in the production of high-calorific biochar. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 3, pp. 1–18. DOI: 10.3390/ma15031038.
10. Fahmy T.Y.A., Fahmy Y., Mobarak F., El-Sakhawy M., Abou-Zeid R.E. Biomass pyrolysis: past, present, and future. *Environment, Development and Sustainability*, 2020, vol. 22, pp. 17–32. DOI: 10.1007/s10668-018-0200-5.
11. Li C.-Z. Some recent advances in the understanding of the pyrolysis and gasification behaviour of Victorian brown coal. *Fuel*, 2007, vol. 86, no. 12–13, pp. 1664–1683. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.01.008.
12. Mishustin O.A., Zheltobryukhov V.F., Gracheva N.V., Khantimirova S.B. Review of the development and application of pyrolysis technologies for waste processing. *Young scientist*, 2018, vol. 231, no. 45, pp. 42–45. (In Russ.)
13. Demirbas A. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, vol. 30, pp. 219–230. DOI: 10.1016/j.peccs.2003.10.004
14. Lishtvan I.I., Dudarchik U.M., Kraiko V.M., Anufrieva E.V., Smoljachkova E.A. Energy and technology use of biomass. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series*, 2017, no. 4, pp. 91–101. (In Russ.)
15. Rizhiya E.Ya., Boitsova L.V., Vertebniy V.E., Horak J., Moskvina M.A., Dubovitskaya V.I., Khomyakov Yu.V. Effect of biochar application on variability of the polyphenoloxidase and peroxidase activity of sod-podzolic soil under low and high fertility. *Agricultural Biology*, 2022, vol. 57, no. 3, pp. 476–485. (In Russ.) DOI: 10.15389/agrobiology.2022.3.476rus.
16. Bovsun M.A., Nesterova O.V., Semal V.A., Sakara N.A. The influence of the biochar application on the CO₂ emission from Luvic Anthrosols in the south of Primorsky region (Russian Far East). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing*, 2021, vol. 862, no. 1, pp. 012091. DOI: 10.1088/1755-1315/862/1/012091.
17. Shafawi A.N., Mohamed A.R., Lahijani P., Mohammadi M. Recent advances in developing engineered biochar for CO₂ capture: an insight into the biochar modification approaches. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, no. 6, pp. 106869. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106869.
18. Sridevi V., Surya D.V., Reddy B.R., Shah M., Gautam R., Kumar T.H., Puppala H., Pritam K.S., Basak T. Challenges and opportunities in the production of sustainable hydrogen from lignocellulosic biomass using microwave-assisted pyrolysis: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol. 52, pp. 507–531. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.186.
19. Potnuri R., Surya D.V., Rao C. S., Yadav A., Sridevi V., Remya N. A review on analysis of biochar produced from microwave-assisted pyrolysis of agricultural waste biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, pp. 106094. DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106094.
20. Su G., Ong H.C., Cheah M.Y., Chen W.H., Lam S.S., Huang Y. Microwave-assisted pyrolysis technology for bioenergy recovery: mechanism, performance, and prospect. *Fuel*, 2022, vol. 326, pp. 124983. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124983.
21. Gunich S.V., Yanchukovskaya E.V., Dneprovskaya N.I. Processing of sludge treatment facilities. *Proceedings of Universities Applied Chemistry and Biotechnology*, 2017, vol. 7, pp. 184–188. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-1-183-187.
22. Suresh A., Alagusundaram A., Kumar P.S., Vo D.-V.N., Christopher F.C., Balaji B., Viswanathan V., Sankar S. Microwave pyrolysis of coal, biomass and plastic waste: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, vol. 19, pp. 3609–3629. DOI: 10.1007/s10311-021-01245-4.
23. Kiryaeva T.A. Study of the composition of coal-methane geomaterials using microwave pyrolysis of coal. *Interexpo Geo-Siberia*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 93–96. (In Russ.)
24. Cheng S., Zhang Z., Zhang D., Deng Y. Microwave irradiation pyrolysis of rice straw in ionic liquid ([Emim] Br). *BioResources*, 2013, vol. 8, no. 3, pp. 3994–4003.
25. Lei H., Ren S., Julson J. The effects of reaction temperature and time and particle size of corn stover on microwave pyrolysis. *Energy & Fuels*, 2009, vol. 23, no. 6, pp. 3254–3261.
26. 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, no. 2, pp. 316–322. DOI: 10.1016/j.jaap.2011.03.010.
27. Zhou R., Lei H., Julson J.L. Effects of reaction temperature, time and particle size on switchgrass microwave pyrolysis and reaction kinetics. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 53–61.
28. Chalapat K., Sarvala K., Li J., Paraoanu G.S. Wideband reference-plane invariant method for measuring electromagnetic parameters of materials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, vol. 57, no. 1, pp. 2257–2267. DOI: 10.1109/TMTT.2009.2027160.
29. Tabakaev R.B., Dimitryuk I.D., Kalinich I.K., Astafiev A.V., Gil A.V., Ibraeva K.T., Chumerin P.Y. Experimental research of microwave pyrolysis of solid organic fuels. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 190–199. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3789.
30. Vassilev S.V., Vassileva C.G., Vassilev V.S. Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: an overview. *Fuel*, 2015, vol. 158, pp. 330–350. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.05.050.
31. Brandt A.A. *Study of dielectrics at ultrahigh frequencies*. Moscow, Fizmatlit Publ., 1963. 403 p. (In Russ.)
32. Baker-Jarvis J. Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements. *NASA STI/Recon Technical Report N*, 1990, vol. 91, pp. 28482.
33. Tabakaev R., Ibraeva K., Astafev A., Dubinin Yu., Yazukov N., Zavorin A., Yakovlev V. Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis. *Fuel*, 2019, vol. 245, pp. 29–38. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.02.049.
34. Gajdabrus M.A. Study of the possibility of catalytic reduction of tar products in the composition of sawdust pyrolysis gas. *Modern trends and innovations in science and production. Proceedings of the XII International scientific and practical conference. Mezhdurechensk*, April 26, 2023. Kemerovo, Kuzbass State Technical University Publ., pp. 515.1–515.7. (In Russ.)

35. Lebedeva M.A., Kolesnik V.D., Mashukov V.I., Egorov A.V. Chromatographic determination of the chemical composition of heavy pyrolysis resins. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2010, vol. 316, no. 3, pp. 102–105. (In Russ.)
36. Vlaskin M.S., Zaychenko V.M., Belov P.V., Grigorenko A.V., Kurbatova A.I., Eremin A.V., Fortov V.E. Decomposition of acetylene into hydrogen and carbon: experiments with an internal combustion engine and experiments with a flow reactor. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2021, vol. 55, no. 2, pp. 251–260. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0040357121020135.
37. Ahmed S., Aitani A., Rahman F., Al-Dawood A., Al-Muhaish F. Decomposition of hydrocarbons to hydrogen and carbon. *Applied Catalysis A: General*, 2009, vol. 359, no. 1–2, pp. 1–24. DOI: 10.1016/j.apcata.2009.02.038.
38. Wal R.V., Nkiawete M.M. Carbons as catalysts in thermo-catalytic hydrocarbon decomposition: a review. *C, Journal of Carbon Research*, 2020, vol. 6, no. 2, p. 23. DOI: 10.3390/c6020023.
39. Zerlitsyn A.G., Shiyani V.P., Shiyani L.N., Magomadova S.O. Destruction of organic compounds in gaseous and liquid media in microwave discharge plasma. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 10, pp. 65–71. (In Russ.)
40. Shiyani V.P., L Shiyani.N., Magomadova S.O., Zherlitsyn A.G. Destruction of organic compounds in gaseous and liquid media in plasma microwave discharge. *2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), IEEE*, 2016, pp. 345–349. DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884265.
41. Shiyani L.N., Zherlitsyn A.G., Magomadova S.O., Lazar C.S. Study of the mechanism of interaction of microwave plasma discharge with solutions of organic substances. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 685, pp. 657–661. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.657.
42. Surovikin Yu.V., Shaitanov A.G., Rezanov I.V., Syryeva A.V. Thermogas-chemical modification of carbon black: structure and properties. *Monograph chapter Technological combustion*, 2018, vol. 7, pp. 161–191. (In Russ.) DOI: 10.31857/S9785907036383000007.
43. Feng M., Zhao J., Petek H. Atomlike, hollow-core-bound molecular orbitals of C60. *Science*, 2008, vol. 320, no. 5874, pp. 359–362. DOI: 10.1126/science.1155866.
44. Tabakaev R., Kalinich I., Mostovshchikov A., Dimitryuk I., Asilbekov A., Ibraeva K., Gaidabrus M., Shanenkov I., Rudmin M., Yazykov N., Preis S. Microwave pyrolysis of cattle manure: initiation mechanism and product characteristics. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, pp. 1–12. DOI: 10.1007/s13399-023-04686-9.

Information about the authors

Ivan K. Kalinich, Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-9597-7671>; ikk5@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9597-7671>

Alexander V. Astafev, Cand. Sc., Researcher, Tyumen State University, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation; a.v.astafev@utmn.ru

Andrei V. Mostovshchikov, Dr. Sc., Director of Research Institute of Construction Materials, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2, Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russian Federation; Professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; mostovshchikov@tsuab.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6401-9243>

Roman B. Tabakaev, Cand. Sc., Leading Researcher, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Senior Researcher, Tyumen State University, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation; TabakaevRB@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3879-7353>

Received: 20.08.2024

Revised: 20.10.2024

Accepted: 11.11.2024