

Оригинальная статья / Original article

УДК 66.085.

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-750-758>

Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза торфа

© Т.О. Крапивницкая^{***}, А.А. Богдашов^{*}, А.Н. Денисенко^{*},
М.Ю. Глявин^{*}, Н.Ю. Песков^{*}, Л.Л. Семенычева^{**}, Д.Л. Ворожцов^{**}

^{*} Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

^{**} Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Резюме: Работа посвящена исследованию деструкции верхового сфагнового торфа под воздействием микроволнового излучения. Для анализа физико-химических процессов создана лабораторная установка на основе коаксиального резонатора-реактора, геометрия которого обеспечивает однородное распределение СВЧ-поля в объеме реактора. В качестве источника СВЧ-излучения использовался промышленный магнетрон с частотой 2,45 ГГц мощностью до 1 кВт. При лабораторных исследованиях с относительно небольшим объемом торфа (~100 г) достоинством созданной установки является возможность быстрого достижения температуры, необходимой для осуществления реакции пиролиза при относительно малом уровне СВЧ-мощности, который в данных экспериментах составлял около 100 Вт. Анализ полученных в ходе реакции продуктов производился на хромато-масс-спектрометре. Проводимые исследования направлены на создание высокоэффективных экологически чистых технологий переработки биотоплива с высоким выходом горючих газов, пригодных для дальнейшего использования в промышленных энергетических установках, а также получения смолистой фракции для создания легких углеводородов и углеродистого остатка для современных высокоэффективных сорбентов. На основе созданной экспериментальной установки проведены исследования мягкого СВЧ-пиролиза торфа при температуре 250 °С в условиях постоянного отвода газообразных продуктов реакции. Получены и проанализированы образцы твердой, жидкой и газовой фаз, представляющие собой ценный углеродистый остаток, маслянистую фракцию и пиролизный газ. В статье анализируется возможность промышленного применения продуктов реакции. Проведено сравнение химического состава продуктов реакции при СВЧ-пиролизе и «традиционном» пиролизе с термическим нагревом. Показано, что в составе выделившихся в процессе СВЧ-пиролиза газов отсутствуют тяжелые ядовитые газы, которые во множестве сопровождают процесс «традиционного» термического пиролиза. Снижение количества ядовитых газов улучшает экологическую составляющую производства. Указанное обстоятельство свидетельствует о перспективности СВЧ-пиролиза для промышленной переработки органических материалов.

Ключевые слова: микроволновый пиролиз торфа, высокотехнологичная обработка органических материалов, мощное микроволновое излучение, возобновляемые источники энергии, энергосберегающие экологически чистые технологии

Благодарности: Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Новые материалы и ресурсосберегающие технологии» и при поддержке гранта «Умник-2017» № 13188/2018 и программы фундаментальных научных исследований № 0035-2019-0001.

Информация о статье: Дата поступления 11 сентября 2019 г.; дата принятия к печати 5 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 декабря 2019 г.

Для цитирования: Крапивницкая Т.О., Богдашов А.А., Денисенко А.Н., Глявин М.Ю., Песков Н.Ю., Семенычева Л.Л., Ворожцов Д.Л. Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза торфа // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9, N 4. С. 750–758. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-750-758>

Microwave pyrolysis experimental study of peat

Tatiana O. Krapivnitskaia^{*,**}, Alexander A. Bogdashov^{*},
Andrey N. Denisenko^{*}, Mikhail Yu. Glyavin^{*}, Nikolai Yu. Peskov^{*},
Lyudmila L. Semenycheva^{**}, Dmitriy L. Vorozhtcov^{**}

^{*} Institute of Applied Physics Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation

^{**} Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract: *The work is devoted to the study of the destruction of the top sphagnum peat layer due to microwave radiation. For the analysis of physical and chemical processes, a laboratory setup was created on the basis of a coaxial resonator-reactor having a geometry that ensures a uniform distribution of the microwave field in the reactor volume. An industrial magnetron having a frequency of 2.45 GHz and a power of up to 1 kW was used as a source of microwave radiation. In laboratory studies with a relatively small amount of peat (~ 100 g), the advantage of the created setup consists in the ability to quickly achieve the necessary temperature for the pyrolysis reaction at a relatively low level of microwave power (~ 100 W) in these experiments. The analysis of the products obtained during the reaction was carried out using a gas chromatography mass spectrometer. The research was aimed at creating highly-efficient environmentally-friendly technologies for processing biofuels characterised by a high yield of combustible gases suitable for further use in industrial power plants, as well as for obtaining a resinous fraction for the production of light hydrocarbons and a carbon residue for modern highly efficient sorbents. On the basis of the experimental setup, studies were carried out on soft microwave pyrolysis of peat at a temperature of 250 °C under constant removal of gaseous reaction products. Samples of solid, liquid and gas phases presenting valuable carbon residues, oily fractions and a pyrolysis gas, respectively, were obtained and analysed. The article examines the possibility for industrial application of reaction products. The chemical composition of the reaction products during both microwave and "traditional" pyrolysis with thermal heating is compared. The composition of the gases released during microwave pyrolysis is characterised by the absence of heavy toxic gases often accompanying the process of "traditional" thermal pyrolysis. Reducing the amount of toxic gases improves the environmental component of production. This circumstance indicates the prospects of microwave pyrolysis for industrial processing of organic materials.*

Keywords: *microwave pyrolysis, peat, high-tech processing of organic materials, powerful microwave radiation, renewable energy sources, energy-saving environmentally friendly technologies*

Acknowledgements: *the work was carried out using the equipment of the CCP "New materials and resource-saving technologies" and with the support of the grant "Umnik-2017" No. 13188/2018 and programs of fundamental scientific research No. 0035-2019-0001.*

Information about the article: *Received September 11, 2019; accepted for publication December 5, 2019; available online December 30, 2019.*

For citation: Krapivnitskaia TO, Bogdashov AA, Denisenko AN, Glyavin MYu, Peskov NYu, Semenycheva LL, Vorozhtcov DL. Microwave pyrolysis experimental study of peat. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2019;9(4): 750–758. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-750-758>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большую актуальность приобретают научные исследования в области физико-химической переработки органического сырья. Для переработки органических веществ и материалов – нефти, угля, торфа, древесины, сельскохозяйственных и промышленных отходов, бытового мусора, широко используется технология пиролиза. В отличие от наиболее распространенного термического (основанного на теплопроводности от поверхностных слоев) нагрева актуальным представляется использование объемного (СВЧ) нагре-

ва материалов [1–17]. Материалом, имеющим широкий спектр практического применения и методов его переработки является торф. Торф – возобновляемый природный биоресурс, который образуется в результате естественного отмирания и неполного распада болотных растений под воздействием биологических процессов в условиях повышенной влажности и недостатка кислорода¹. Распространенным методом переработки торфа является пиролиз –

¹ Крамаренко В.В. Грунтоведение: учебник. М.: Юрайт, 2016. 430 с.

термическая деструкция органических соединений на углеводороды с меньшей молекулярной массой при воздействии высокой температуры без доступа кислорода.

В зависимости от химического состава сырья и физико-химических условий протекания реакции (температуры, давления, влажности, степени присутствия кислорода и др.) процесс пиролиза имеет специфический характер с выходом различных твердых, жидких и газообразных веществ [18, 19]. Одним из важнейших параметров, влияющим на процесс пиролиза, является температура в реакторе. В зависимости от этого выделяют три вида пиролиза: мягкий пиролиз происходит при температурах до 500 °С, нормальный (средний) – 500–800 °С, и жесткий пиролиз – 800–1100 °С. Температура определяет степень деструкции исходных веществ и состав продуктов пиролиза. С ростом температуры соотношение между тремя фазами продуктов разложения меняется: становится меньше выход жидких и твердых остатков (полукокс в случае мягкого пиролиза, кокс в двух других случаях) и увеличивается выход газов, имеющих все меньшую теплоту сгорания.

Наиболее перспективным с экологической точки зрения в настоящее время представляется извлечение органических составляющих в результате СВЧ-пиролиза, поскольку процесс микроволнового нагрева не приносит никаких загрязнений ни в обрабатываемый материал, ни в окружающую среду. Важнейшее преимущество СВЧ-воздействия также заключается в том, что электромагнитные волны проникают на значительную глубину в обрабатываемый материал и при поглощении создают объемное распределение источников тепла, обеспечивая эффективный нагрев материалов с низкой теплопроводностью. При использовании традиционной схемы теплового пиролиза теплопроводность материалов существенно влияет на скорость подвода тепла в область реакции. Поскольку при СВЧ-нагреве температурой материалов во всем объеме реактора можно оперативно управлять, изменяя мощность СВЧ-генератора, дополнительным преимуществом СВЧ-пиролиза является возможность оперативного регулирования скорости пиролизических реакций и состава продуктов на выходе из реактора.

В данной статье описывается лабораторная установка, в которой источником излучения является промышленный магнетрон, работающий на частоте 2,45 ГГц, с регулируемым уровнем выходной СВЧ-мощности. Представлены результаты исследований деструкции торфа в условиях мягкого СВЧ-пиролиза при постоянном отводе газообразных продуктов реакции. Выполнен сравнительный анализ продуктов, полученных при СВЧ-

пиролизе и при пиролизе с термическим нагревом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проведения экспериментов по исследованию процесса СВЧ-пиролиза в Институте прикладной физики РАН (ИПФ РАН) разработана лабораторная установка с электродинамической схемой реактора в виде коаксиального резонатора. Данная установка позволяет проводить исследования по воздействию микроволнового излучения на относительно небольшие (порядка 100 г) объемы органических материалов, достаточные для лабораторного анализа, при «бытовом» (не более 1 кВт) уровне СВЧ-мощности. В проведенных экспериментах для нагрева образцов до температур, обеспечивающих инициацию реакции пиролиза, потребовалась СВЧ-мощность на уровне 100 Вт. Выбор электродинамической схемы реактора обусловлен рядом факторов: во-первых, высокой однородностью СВЧ-поля в объеме реактора и, как следствие, равномерным прогревом материала во всем объеме реактора; во-вторых, простотой измерения физических параметров эксперимента (в частности, температура материала в различных точках, коэффициент отражения, добротность резонатора и др.); в-третьих, возможностью построения адекватной математической модели реактора для последующего численного моделирования процессов. Лабораторная установка показана на рис. 1 [20].

Источником СВЧ-излучения является промышленный магнетрон 1 с высоковольтным источником питания 2, позволяющим устанавливать заданный уровень выходной СВЧ-мощности. Передача излучения от магнетрона в реактор осуществляется с помощью гибкого коаксиального кабеля 3. Реактор представляет собой коаксиальный резонатор 4, заполняемый торфом. Для уменьшения коэффициента отражения излучения от нагруженного резонатора-реактора на рабочей частоте 2,45 ГГц производится первоначальная установка оптимальной длины резонатора. Для контроля отраженного сигнала в процессе СВЧ-пиролиза в коаксиальный тракт включен направленный ответвитель 5. Измерение температуры проводилось на внешней границе торфа с помощью термопары 6. Загрузка реактора верховым сфагновым торфом при влажности 50 % составляла в среднем 100 г. В данной серии экспериментов мощность СВЧ-излучения устанавливалась около 100 Вт. Это ограничение связано с тепловым нагревом коаксиального ввода резонатора. Коэффициент отражения от резонатора в процессе пиролиза не превышал -10 дБ. Продукты пиролиза выводились с противоположной относительно СВЧ-ввода стороны резонатора через откач-

ной порт 7. Жидкая и маслянистая фракции оседали в отстойнике, а пиролизный газ осаждался и фиксировался в криогенной ловушке. Для контроля процесса откачки газа использовались манометр 8 и газовый счетчик 9.

Достоинством данной лабораторной конструкции (с загрузкой небольшим количеством топлива) является возможность быстрого достижения температуры, необходимой для осуществления реакции мягкого пиролиза при относительно малом уровне мощности, указанном выше. Нагрев торфа на внешнем контуре уста-

новки до температуры 250 °С осуществлялся в течение 10–15 мин. Следует отметить, что особенностью используемой экспериментальной установки является значительная неоднородность СВЧ-поля в объеме реактора, приводящая к неоднородности нагрева топлива внутри объема реактора. На рис. 2 показано изменение температуры торфа вблизи стенки коаксиального резонатора в процессе пиролиза. Для предотвращения перегрева коаксиального ввода выбран момент выключения магнетрона при температуре на термопаре около 250 °С.

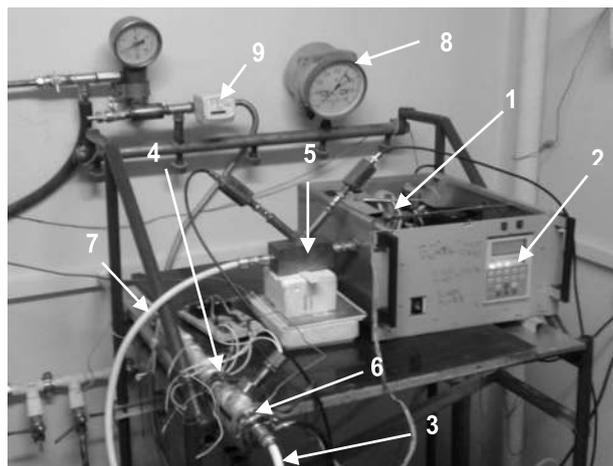


Рис. 1. Экспериментальная установка СВЧ-пиролиза торфа с коаксиальным резонатором: 1 – СВЧ-источник (промышленный 2,45 ГГц магнетрон); 2 – высоковольтный источник питания; 3 – устройство ввода СВЧ-мощности на основе коаксиального кабеля; 4 – лабораторный СВЧ-ректор на основе коаксиального резонатора; 5 – направленный ответвитель; 6 – термопара; 7 – откачной порт с охлаждением отработанных газообразных фракций; 8 – манометр; 9 – газовый счетчик

Fig. 1. Experimental installation of microwave pyrolysis of peat with coaxial resonator: 1 – microwave source - industrial 2.45 GHz magnetron; 2 – hvps; 3 – input device of microwave power on the basis of coaxial cables; 4 – laboratory microwave-rector on the basis of the coaxial resonator; 5 – directional coupler; 6 – thermocouple; 7 – evacuation port with exhaust gas cooling; 8 – manometer; 9 – gas meter

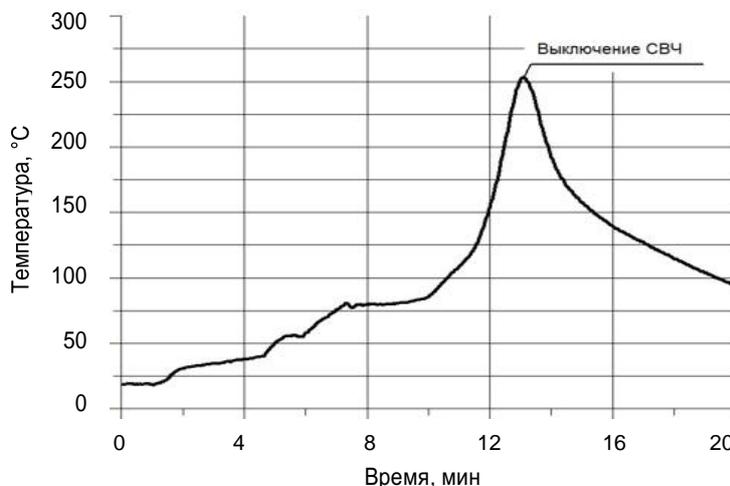


Рис. 2. Изменение температуры торфа вблизи стенки коаксиального резонатора в процессе пиролиза

Fig. 2. Changes in the peat temperature near the wall of the coaxial cavity during pyrolysis

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной серии экспериментов проводилось сравнение проб, полученных в результате «традиционного» теплового пиролиза при температуре 250 °С и СВЧ-пиролиза в условиях постоянного отвода газообразных продуктов реакции.

Анализ полученных в ходе реакции газовой и жидкой фракций производился на хромато-масс-спектрометре GCMS QP2010 Ultra (Shimadzu, США). Определение химического состава осуществлялось по пикам молекулярных и характеристических осколочных ионов. Газовую пробу пиролизата торфа объемом ~2,0 мл загружали газовым шприцом в инжектор хромато-масс-спектрометра. Образец смешивался с потоком газа-носителя (гелий 6.0) при температуре 300 °С. Далее компоненты пробы разделялись на капиллярной хроматографической колонке ZB-FFAP в течение 30 мин. Результаты анализа представлены в табл. 2. Из общей смеси была исключена вода и произведен пересчет на 100 % масс. вещества. Эксперименты показали, что маслянистая фракция представляет собой смесь низших карбоновых кислот и ароматических углеводородов.

ментов по СВЧ-пиролизу отсутствуют. В то же время несколько повышен выход газообразного продукта реакции. В условиях промышленного производства газообразные продукты реакции, представляющие собой горючие газы, могут быть использованы в качестве источника энергии для газогенератора электричества, что позволит сократить энергопотребление установки [20].

Маслянистую фракцию пиролизата торфа объемом 0,1 мкл загружали в инжектор хромато-масс-спектрометра. Испарение анализируемого вещества происходило в потоке газа-носителя (гелий 6.0) при температуре 250 °С. Далее компоненты образца разделялись на капиллярной хроматографической колонке ZB-FFAP в течение 30 мин. Результаты анализа представлены в табл. 2. Из общей смеси была исключена вода и произведен пересчет на 100 % масс. вещества. Эксперименты показали, что маслянистая фракция представляет собой смесь низших карбоновых кислот и ароматических углеводородов.

Таблица 1
Хромато-масс-спектрометрический анализ пиролитических газов

Table 1
Chromatography-mass spectrometry analysis of pyrolytic gases

| Соединение | Термический нагрев | СВЧ-нагрев |
|---------------------------------------|--------------------|------------|
| CO ₂ +N ₂ +ect. | 68,9 | 69,9 |
| Пропен | 15,5 | – |
| Бутен | 8,5 | – |
| Фуран | 3,7 | 7,7 |
| Циклопентадиен | 0,9 | 0,2 |
| Гексан | 0,1 | 0,3 |
| 2-метилфуран | 0,8 | 0,3 |
| Изопентаналь | 0,1 | 5,0 |
| Бензол | 0,6 | 0,3 |
| Гептан | 0,1 | 0,9 |
| н-Бутилвиниловый эфир | 0,2 | 0,2 |
| Метан | 3,7 | – |
| Этан | 0,2 | 3,3 |
| Пропан | 2,6 | 0,1 |
| Ацетальдегид | – | 6,3 |
| Ацетон | – | 7,1 |

Измерения показали, что тяжелые ядовитые газы в процессе проводимых экспери-

Таблица 2
Хромато-масс-спектрометрический анализ маслянистой фракции

Table 2
Chromatography-mass spectrometry analysis of the oily fraction

| Соединение | Термический нагрев | СВЧ-нагрев |
|-----------------------|--------------------|------------|
| Ацетальдегид | 7,33 | 1,18 |
| Метанол | 8,67 | 5,69 |
| Ацетол | 8,67 | 4,12 |
| Ацетон | 18,67 | 23,04 |
| Уксусная кислота | 16,67 | 19,02 |
| 5-метил-2-фуральдегид | 10,00 | – |
| Фуральдегид | 30,00 | – |
| Пропионовая кислота | – | 7,55 |
| 2-формил-5-метилфуран | – | 8,43 |
| Фенол | – | 3,82 |
| Крезол | – | 0,88 |
| Муравьиная кислота | – | 2,25 |
| Фурфурол | – | 24,02 |

В табл. 3 представлены результаты элементного анализа углеродистого остатка после СВЧ-обработки в сравнении с «традиционным» термическим нагревом. Процентный выход углерода при СВЧ-нагреве в 1,4 раза больше, чем при обычном тепловом нагреве. Повышенное содержание углерода в остатке позволяет рассчитывать на большее выделение аллотропных модификаций углерода из смеси.

Таблица 3

Углеродистый остаток в процессе пиролиза торфа

Table 3

Carbon residue in the process of peat pyrolysis

| Исходный торф | Массовая доля, % | | | |
|---------------------------------|------------------|---------|----------|-----------|
| | азот | углерод | водород | сера |
| Образец перед СВЧ-нагревом | 1,75±0,09 | 60±3 | 7,36±0,4 | менее 0,3 |
| Образец после СВЧ-нагрева | 2,47±0,12 | 84±4 | 4,9±0,3 | менее 0,3 |
| Образец после теплового нагрева | 1,4 | 64,28 | 5,02 | менее 0,3 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан лабораторный реактор на основе коаксиального резонатора для СВЧ-пиролиза небольших объемов органического топлива. С использованием данной установки, работающей на частоте 2,45 ГГц при уровне вводимой СВЧ-мощности около 100 Вт, при температуре около 250 °С проведены эксперименты по реализации процесса мягкого пиролиза торфа в условиях постоянного отвода газообразных продуктов реакции. Получены и проанализированы продукты пиролиза торфа: ценный углеродистый остаток, маслянистая фракция и пиролизный газ. В случае СВЧ-пиролиза содержание фракций характеризуется значительно большим набором органических соединений. Рассмотрена возможность промышленного применения указанных выше продуктов пиролиза. Пиролизный газ, содержащий метан, может использоваться либо как топливо, либо как исходное вещество для цепочки последовательных технологических процессов производства предельных ациклических углеводородов и синтетических полимеров; жидкая маслянистая фракция – как исходное вещество для выделения легких ароматических углеводородов; углеродистый остаток (содержание углерода более

60 %) – в различных сферах производства, включая производство электродов для алюминиевой промышленности и заземлителей, новых аллотропных модификаций углерода (нанотрубки, фуллерены), углеволокна, сорбентов. В составе выделившихся в процессе СВЧ-пиролиза газов, согласно проведенному химическому анализу, отсутствуют тяжелые ядовитые газы, которые во множестве сопровождают процесс традиционного термического пиролиза и затрудняют (с экологической точки зрения) его промышленное применение. Это позволяет в дальнейшем рассчитывать на перспективу использования СВЧ-пиролиза для переработки отходов вредных производств. Все вышеизложенное свидетельствует о перспективности микроволнового метода переработки торфа.

На следующем этапе работ предполагается модифицировать конструкцию реактора с увеличением мощности СВЧ-генератора и массы загружаемого материала, а также поднять температуру в реакторе для более глубокой переработки исходного вещества. Результаты данных исследований могут послужить основой для создания компактных и высокоэффективных промышленных установок для переработки органических материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гунич С.В., Янчуковская Е.В. Анализ процессов пиролиза отходов производства и потребления // Известия Вузов. Прикладная химия и биотехнология 2016. Т. 6. N 1 (16). С. 86–93.
2. Куряева Т.А. Исследование состава углеметановых геоматериалов с помощью СВЧ пиролиза каменного угля // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 2. N 3. С. 93–96.
3. Яцун А.В., Коновалов П.Н., Коновалов Н.П. СВЧ-пиролиз изношенных автомобильных шин в присутствии гидроксида калия // Современные наукоемкие технологии. 2017. N 2 (13). С. 83–87.
4. Гунич С.В., Янчуковская Е.В., Днепровская Н.И. Анализ современных методов переработки твердых бытовых отходов // Известия Вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2015. N 2 (13). С. 110–115.
5. Полищук Т.С., Череватюк Г.В., Патрушева О.В. Использование микроволнового излучения в нефтехимии // Молодой ученый. 2017. N 2-1 (136). С. 23–27.
6. Yang J., Chen H., Zhao W., Zhou J. TG-FTIR-MS study of pyrolysis products evolving from peat // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2016. Vol. 117. P. 296–309. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.11.002>
7. Chen X., Che Q., Li S., Liu Z., Yang H., Chen Y., et al. Recent developments in lignocellulosic biomass catalytic fast pyrolysis: Strategies for the optimization of bio-oil quality and yield // Fuel Processing Technology. 2019. Vol. 196. 106180.
8. Makkawi Y.T., Sayed Y.El., Salih M., Nancarrow P., Banks S.W., Bridgwater T. Fast pyrolysis of date palm (*Phoenix dactylifera*) waste in a bubbling fluidized bed reactor // Renewable Energy. 2019. Vol. 43. P. 719–730. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.028>
9. Lam S.S., Wan Mahari W.A., Ok Y.S., Peng W., Chong C.T., Ma N.L., et al. Microwave vacuum

pyrolysis of waste plastic and used cooking oil for simultaneous waste reduction and sustainable energy conversion: Recovery of cleaner liquid fuel and techno-economic analysis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 115. P. 109359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109359>

10. Khiari B., Jeguirim M. Tunisian agro-food wastes recovery by pyrolysis: Thermogravimetric analysis and kinetic study // 10th International Renewable Energy Congress (IREC). 26–28 March 2019, Sousse, Tunisia. <https://doi.org/10.1109/IREC.2019.8754614>

11. Zhang Y., Cheng Q., Wang D., Xia D., Zheng X., Li Z., et al. Preparation of Pyrolytic Carbon from Waste Tires for Methylene Blue Adsorption // *JOM. Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. 2019. Vol. 71. Issue 10. P. 3658–3666. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03658-7>

12. Lambert A., Anawati J., Walawalkar M., Tam J., Azimi G. Innovative Application of Microwave Treatment for Recovering of Rare Earth Elements from Phosphogypsum // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2018. Vol. 6. Issue 12. P. 16471–16481. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03588>

13. Wahi R., Abdul Aziz S.M., Hamdan S., Ngaini Z. Biochar production from agricultural wastes via low-temperature microwave carbonization // *IEEE International RF and Microwave Conference*. 2015. Vol. 4. P. 250–253. <https://doi.org/10.1109/RFM.2015.7587754>

14. Klinger J., Bar-Ziv E., Shonnard D.R., Westover T., Emerson R. Predicting Properties of Gas and Solid Streams by Intrinsic Kinetics of Fast Pyrolysis of Wood // *Energy and Fuels*. 2016. Vol. 30. Issue 1. P. 318–325. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01877>

15. Markin V.I., Cheprasova M.Yu., Bazarnova N.G. General areas of the use of a microwave

radiation for processing of plant raw materials (review) // *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*. 2015. Vol. 41. Issue 7. P. 686–699. <https://doi.org/10.1134/S1068162015070110>

16. Borges F.C., Du Z-Y., Xie Q., Trierweiler J.O., Cheng Y., Wan Y., et al. Fast microwave assisted pyrolysis of biomass using microwave absorbent // *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 56. P. 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.038>

17. Ren S., Lei H., Wang L., Bu Q., Chen S., Wu J., et al. Microwave pyrolysis of Douglas fir sawdust pellet // *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting*. 2011. Vol. 2. P. 1334–1348. <https://doi.org/10.13031/2013.37300>

18. Богдашов А.А., Крапивницкая Т.О., Песков Н.Ю. Моделирование тепловых и электродинамических процессов при СВЧ-пиролизе торфа // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2018): материалы 28-й Междунар. Крымской конф. (Севастополь, 9–15 сентября 2018 г.). Севастополь, 2018. Т. 6. С. 1381–1387.

19. Kravivnitskaia T.O., Bogdashov A.A., Denisenko A.N., Glyavin M.Yu., Kalynov Yu.K., Kuzikov S.V., et al. High-temperature microwave pyrolysis of peat as a method to obtaining liquid and gaseous fuels // *EPJ Web of Conferences*. 10th International Workshop 2017 “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”. 2017. Vol. 149. 02023. 2 p. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714902023>

20. Богдашов А.А., Крапивницкая Т.О., Денисенко А.Н., Песков Н.Ю., Глявин М.Ю., Семеничева Л.Л. [и др.]. СВЧ-пиролиз торфа: результаты и перспективы // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2018): материалы 28-й Междунар. Крымской конф. (Севастополь, 9–15 сентября 2018 г.). Севастополь, 2018. Т. 6. С. 1394–1399.

REFERENCES

1. Gunich SV, Yanchukovskaya EV. Analysis of processes of pyrolysis of wastes of production and consumption. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2916;6(1):86–93. (In Russian)

2. Kiryaeva TA. Analysis of coal-and-methane geomaterial composition using microwave-assisted pyrolysis of black coal. *Interekspo Geo-Sibir*. 2015;2(3):93–96. (In Russian)

3. Yatsun AV, Konovalov PN, Konovalov NP. Microwave pyrolysis of scrap tires in the presence of potassium hydroxide. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* = Modern high technologies. 2017;2(13):83–87. (In Russian)

4. Gunich SV, Yanchukovskaya EV, Dneprovskaya NI. Analysis of modern methods of hard domestic wastes processing. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings

of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2015;(2):110–115. (In Russian)

5. Polishchuk TS, Cherevatyuk GV, Patrusheva OV. The use of microwave radiation in petrochemistry. *Molodoi uchenyi* = Young scientist. 2017;(2-1):23–27. (In Russian)

6. Yang J, Chen H, Zhao W, Zhou J. TG–FTIR–MS study of pyrolysis products evolving from peat. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2016;117:296–309. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.11.002>

7. Chen X, Che Q, Li S, Liu Z, Yang H, Chen Y, et al. Recent developments in lignocellulosic biomass catalytic fast pyrolysis: Strategies for the optimization of bio-oil quality and yield. *Fuel Processing Technology*. 2019;196:106180.

8. Makkawi YT, Sayed YEI, Salih M, Nancarrow P, Banks SW, Bridgwater T. Fast pyrolysis of date palm (*Phoenix dactylifera*) waste in a bubbling

fluidized bed reactor. *Renewable Energy*. 2019;43: 719–730. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.028>

9. Lam SS, Wan Mahari WA, Ok YS, Peng W, Chong CT, Ma NL, et al. Microwave vacuum pyrolysis of waste plastic and used cooking oil for simultaneous waste reduction and sustainable energy conversion: Recovery of cleaner liquid fuel and techno-economic analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;115:109359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109359>

10. Khiari B, Jeguirim M. Tunisian agro-food wastes recovery by pyrolysis: Thermogravimetric analysis and kinetic study. *10th International Renewable Energy Congress (IREC)*. 26–28 March 2019, Sousse, Tunisia. <https://doi.org/10.1109/IREC.2019.8754614>

11. Zhang Y, Cheng Q, Wang D, Xia D, Zheng X, Li Z, et al. Preparation of Pyrolytic Carbon from Waste Tires for Methylene Blue Adsorption. *JOM. Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. 2019;71(10):3658–3666. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03658-7>

12. Lambert A, Anawati J, Walawalkar M, Tam J, Azimi G. Innovative Application of Microwave Treatment for Recovering of Rare Earth Elements from Phosphogypsum. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2018;6(12):16471–16481. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03588>

13. Wahi R, Abdul Aziz SM, Hamdan S, Ngani Z. Biochar production from agricultural wastes via low-temperature microwave carbonization. *IEEE International RF and Microwave Conference*. 2015;4:250–253. <https://doi.org/10.1109/RFM.2015.7587754>

14. Klinger J, Bar-Ziv E, Shonnard DR, Westover T, Emerson R. Predicting Properties of Gas and Solid Streams by Intrinsic Kinetics of Fast Pyrolysis of Wood. *Energy and Fuels*. 2016;30(1):318–325. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01877>

15. Markin VI, Cheprasova MYu, Bazarnova NG. General areas of the use of a microwave radiation for processing of plant raw materials (review). *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*.

2015;41(7):686–699. <https://doi.org/10.1134/S1068162015070110>

16. Borges FC, Du Z-Y, Xie Q, Trierweiler JO, Cheng Y, Wan Y, et al. Fast microwave assisted pyrolysis of biomass using microwave absorbent. *Bioresource Technology*. 2014;156:267–274. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.038>

17. Ren S, Lei H, Wang L, Bu Q, Chen S, Wu J, et al. Microwave pyrolysis of Douglas fir sawdust pellet. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting*. 2011;2:1334–1348. <https://doi.org/10.13031/2013.37300>

18. Bogdashov AA, Krapivnitskaya TO, Peskov NYu. Simulation of microwave pyrolysis of peat. In: *SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii (CriMiCo'2018): materialy 28-i Mezhdunarodnoi Krymskoi konferentsii = Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo-2018): Proceedings of the 28th International Crimean Conference*. 9–15 September 2018, Sevastopol. Sevastopol, 2018, vol. 6, p. 1381–1387. (In Russian)

19. Krapivnitskaia TO, Bogdashov AA, Denisenko AN, Glyavin MYu, Kalynov YuK, Kuzikov SV, et al. High-temperature microwave pyrolysis of peat as a method to obtaining liquid and gaseous fuel. *EPJ Web of Conferences*. 10th International Workshop 2017 “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”. 2017. Vol. 49. 02023. 2 p. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714902023>

20. Bogdashov AA, Krapivnitskaia TO, Denisenko AN, Peskov NYu, Glyavin MYu, Semenycheva LL, et al. Microwave pyrolysis of peat: results and prospects. In: *SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii (CriMiCo'2018): materialy 28-i Mezhdunarodnoi Krymskoi konferentsii = Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo'2018): Proceedings of the 28th International Crimean Conference*. 9–15 September 2018, Sevastopol. Sevastopol, 2018, vol. 6, p. 1394–1399. (In Russian)

Критерии авторства

Крапивницкая Т.О., Богдашов Ф.А., Денисенко А.Н., Глявин М.Ю., Песков Н.Ю., Семеньева Л.Л., Ворожцов Д.Л. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Крапивницкая Т.О., Богдашов Ф.А., Денисенко А.Н., Глявин М.Ю., Песков Н.Ю., Семеньева Л.Л., Ворожцов Д.Л. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Contribution

Tatiana O. Krapivnitskaia, Alexander A. Bogdashov, Andrey N. Denisenko, Mikhail Yu. Glyavin, Nikolai Yu. Peskov, Lyudmila L. Semenycheva, Dmitriy L. Vorozhtcov carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Tatiana O. Krapivnitskaia, Alexander A. Bogdashov, Andrey N. Denisenko, Mikhail Yu. Glyavin, Nikolai Yu. Peskov, Lyudmila L. Semenycheva, Dmitriy L. Vorozhtcov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

AUTHORS' INDEX

Крапивницкая Татьяна Олеговна,
аспирант,
Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского,
603022, Нижний Новгород, пр-т Гагарина, 23,
Российская Федерация;
ведущий инженер,
ФИЦ Институт прикладной физики РАН,
603950, Нижний Новгород,
ул. Ульянова, 46, Российская Федерация,
✉e-mail: kto465@yandex.ru

Богдашов Александр Александрович,
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник,
ФИЦ Институт прикладной физики РАН,
603950, Нижний Новгород,
ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
e-mail: bogdash@appl.sci-nnov.ru

Денисенко Андрей Николаевич,
ведущий конструктор,
ФИЦ Институт прикладной физики РАН,
603950, Нижний Новгород,
ул. Ульянова, 46, Российская Федерация,
e-mail: androu@appl.sci-nnov.ru

Глявин Михаил Юрьевич,
д.ф.-м.н., заведующий лабораторией
микроволновой обработки материалов,
ФИЦ Институт прикладной физики РАН,
603950, Нижний Новгород,
ул. Ульянова, 46, Российская Федерация,
e-mail: glyavin@appl.sci-nnov.ru

Песков Николай Юрьевич,
д.ф.-м.н., профессор РАН,
ведущий научный сотрудник,
ФИЦ Институт прикладной физики РАН,
603950, Нижний Новгород,
ул. Ульянова, 46, Российская Федерация,
e-mail: peskov@appl.sci-nnov.ru

Семенычева Людмила Леонидовна,
д.х.н., заведующая лабораторией
нефтехимии,
Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского,
603022, Нижний Новгород,
пр-т Гагарина, 23, Российская Федерация,
e-mail: lsem@yandex.ru

Ворожцов Дмитрий Леонидович,
к.х.н., ведущий инженер,
Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского,
603022, Нижний Новгород,
пр-т Гагарина, 23, Российская Федерация,
e-mail: dmvorozh@gmail.com

Tatiana O. Krapivnitskaia,
Postgraduate Student,
Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod,
23, Gagarin Ave., Nizhniy Novgorod, 603022,
Russian Federation,
Leading Engineer,
Institute of Applied Physics,
Russian Academy of Sciences,
46, Ul'yanov St., Nizhniy Novgorod 603950,
Russian Federation
✉e-mail: kto465@yandex.ru

Alexander A. Bogdashov,
Cand. (Physics and Mathematics),
Senior Researcher,
Institute of Applied Physics,
Russian Academy of Sciences,
46, Ul'yanov St., Nizhniy Novgorod 603950,
Russian Federation
e-mail: bogdash@appl.sci-nnov.ru

Andrey N. Denisenko,
Leading Designer,
Institute of Applied Physics,
Russian Academy of Sciences,
46, Ul'yanov St., Nizhniy Novgorod 603950,
Russian Federation
e-mail: androu@appl.sci-nnov.ru

Mikhail Yu. Glyavin,
Dr. Sci. (Physics), Head of Laboratory,
Institute of Applied Physics,
Russian Academy of Sciences,
46, Ul'yanov St., Nizhniy Novgorod 603950,
Russian Federation
e-mail: glyavin@appl.sci-nnov.ru

Nikolai Yu. Peskov,
Dr. Sci. (Physics), Professor of Russian Academy
of Sciences, Leading Researcher
Institute of Applied Physics,
Russian Academy of Sciences,
46, Ul'yanov St., Nizhniy Novgorod 603950,
Russian Federation
e-mail: peskov@appl.sci-nnov.ru

Lyudmila L. Semenycheva,
Dr. Sci. (Chemistry), Head of Laboratory,
Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod,
23, Gagarin Ave., Nizhniy Novgorod 603022,
Russian Federation
e-mail: lsem@yandex.ru

Dmitriy L. Vorozhtcov
Cand. (Chemistry), Leading Engineer
Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod,
23, Gagarin Ave., Nizhniy Novgorod 603022,
Russian Federation
e-mail: dmvorozh@gmail.com