

Научная статья
УДК 66.086
EDN: YCIVAU
DOI: 10.21285/achb.909



Исследование продуктов термодеструкции верхового торфа микроволновым излучением

Т.О. Крапивницкая****✉, С.А. Ананичева***, А.Б. Алыева*,
А.А. Вихарев*, Н.Ю. Песков***, А.Н. Денисенко*,
М.Ю. Глявин*, С.В. Зеленцов***, Н.С. Шулаев****

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Российская Федерация

**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация

***Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Российская Федерация

****Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного
нефтяного технического университета (филиал в г. Стерлитамаке),
Стерлитамак, Российская Федерация

Аннотация. Запасы торфа представляют большой интерес в различных отраслях промышленности (энергетическая, топливная, химическая и др.). Для переработки подобных твердых углеродсодержащих ресурсов с последующим получением топлива и ценных продуктов стандартно используют пиролиз. В настоящее время одним из развивающихся экологически и энергетически выгодных способов осуществления деструкции углеродсодержащего сырья является пиролиз с воздействием электромагнитных волн на материал. Микроволновое излучение обеспечивает нагрев материала непосредственно в объеме, что позволяет значительно повысить равномерность нагрева в объеме облучаемого образца, обеспечить большую эффективность теплопередачи и избежать локального перегрева на поверхности реактора. Так, в ходе проведенного исследования разработана конструкция технологического комплекса для микроволновой обработки органических материалов. Описаны конструктивные элементы комплекса, представлена схема разделения продуктов пиролиза. На основе прототипа разработанного реактора проведены эксперименты по деструкции верхового сфагнового торфа Греко-Ушаковского месторождения в режиме мягкого пиролиза, иницированного сверхвысокочастотным излучением. Методом хромато-масс-спектрометрии проанализирован компонентный состав продуктов реакции, выполнено сравнение с результатами предшествующих экспериментов по «традиционному» термическому пиролизу. Более глубокая переработка торфа осуществляется в условиях мягкого сверхвысокочастотного пиролиза с высоким выходом полезных продуктов за счет более эффективной передачи тепла, равномерного нагрева материала и оптимальной скорости реакции. Показано, что разработанная технология позволяет получать сырье для широкого спектра высокотехнологичных промышленных производств. Обсуждаются перспективы промышленного использования предлагаемой сверхвысокочастотной технологии переработки торфа, в частности для производства эффективного гидрофобного сорбента.

Ключевые слова: переработка органического сырья, торф, микроволновый пиролиз, сорбенты

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00763 «Разработка новых физико-химических технологий и СВЧ-комплексов для глубокой переработки целлюлозосодержащих материалов»).

Для цитирования: Крапивницкая Т.О., Ананичева С.А., Алыева А.Б., Вихарев А.А., Песков Н.Ю., Денисенко А.Н. [и др.]. Исследование продуктов термодеструкции верхового торфа микроволновым излучением. С. 265–274. DOI: 10.21285/achb.909. EDN: YCIVAU.

Study of products derived from the microwave-assisted thermal degradation of high-moor peat

Tatiana O. Krapivnitckaia^{*,***✉}, Svetlana A. Ananicheva^{**,*}, Alisa B. Alyeva^{*},
Alexander A. Vikharev^{*}, Nikolai Yu. Peskov^{**,*}, Andrey N. Denisenko^{*},
Mikhail Yu. Glyavin^{*}, Sergey V. Zelentsov^{**,*}, Nikolay S. Shulaev^{****}

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

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

^{***}Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation

^{****}Institute of Chemical Technologies and Engineering of Ufa State Petroleum Technical University (Sterlitamak Branch), Sterlitamak, Russian Federation

Abstract. Peat reserves are of great interest for various industries (energy, fuel, chemical, etc.). It is common practice to use pyrolysis to process such solid carbon-containing resources with the subsequent yield of fuel and valuable products. One of the environmentally and energetically favorable ways to degrade carbon-containing feedstock that is currently under development is microwave-assisted pyrolysis. Microwave radiation provides volumetric heating of the material, which significantly increases heating uniformity across the volume of the irradiated sample, providing greater efficiency of heat transfer and avoiding local overheating on the reactor surface. In the conducted study, a system was designed for the microwave processing of organic materials. The structural elements of the system are described, and a schematic showing pyrolysis product separation is presented. A prototype of the developed reactor was used to conduct experiments on degrading high-moor sphagnum peat of the Greko-Ushakovskoe deposit under mild pyrolysis conditions induced by microwave radiation. The component composition of reaction products was analyzed via chromatography-mass spectrometry and compared with the results of previous experiments using conventional thermal pyrolysis. More advanced processing of peat is performed under the conditions of microwave-assisted mild pyrolysis with a high yield of valuable products due to a more efficient heat transfer, uniform heating of the material, and the optimal reaction rate. The developed technology is shown to produce raw materials for a wide range of high-tech industrial productions. The prospects for the industrial use of the proposed microwave-assisted peat processing technology are discussed, specifically for the production of efficient hydrophobic sorbent.

Keywords: organic feedstock processing, peat, microwave pyrolysis, sorbents

Funding. Russian Science Foundation supported the work (grant no. 23-19-00763).

For citation: Krapivnitckaia T.O., Ananicheva S.A., Alyeva A.B., Vikharev A.A., Peskov N.Yu., Denisenko A.N., et al. Study of products derived from the microwave-assisted thermal degradation of high-moor peat. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(2):265-274. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.909. EDN: YCIVAU.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных природных сырьевых материалов, представляющих в настоящее время большой интерес для топливной промышленности, является торф [1]. Глобальные мировые ресурсы торфа оцениваются до 5×10^{11} т, а его ежегодный прирост в России составляет около $2,5 \times 10^9$ т [2–4]. Эффективная переработка подобных ценных природных биоресурсов может решить ряд экономических, экологических и ресурсосберегающих проблем, особенно в условиях сокращения и усложнения добычи нефти и других углеводородов.

Использование электромагнитного излучения различных диапазонов частот открывает огромное разнообразие возможностей в современных физико-химических исследованиях и расширяет спектр новых технологий [5–9]. Одним из перспективных приложений мощного микроволнового излучения является переработка природного сырья при его

деструкции в процессе сверхвысокочастотного (СВЧ) пиролиза. В тепловых реакторах «традиционного» типа пиролиз органических материалов (в частности, торфа) инициируется в результате их нагрева в процессе теплопередачи (теплопроводности и/или конвекции) от стенок реакционной камеры (которая нагревается либо электронагревательным элементом (трубчатым электронагревателем), либо источником горения) [10–13]. Ввиду относительно низкой теплопроводности органических материалов данный процесс характеризуется неоднородностью температуры в объеме реактора. Это приводит к заметной разнице условий протекания реакции пиролиза и требует применения специальных мер (например, тщательного перемешивания) для предотвращения локального перегрева [14–16].

Пиролиз, возникающий в результате нагрева при электромагнитном воздействии, лишен указанных недостатков, присущих «традиционным» системам.

Основным преимуществом этого метода является объемный характер нагрева материала, возникающего при поглощении СВЧ-излучения. Это позволяет существенно увеличить эффективность теплопередачи, избежать локального перегрева топлива вблизи стенки и обеспечить равномерность распределения температуры в реакторе. Таким образом, более эффективный и быстрый нагрев приводит к снижению энергозатрат, увеличению глубины переработки и большей степени разложения сырья при уменьшении времени обработки.

Данная статья посвящена разработке реактора СВЧ-пиролиза, позволяющего осуществлять переработку среднего количества органических материалов (до 5 кг) с возможностью его дальнейшего масштабирования до промышленных объемов. На основе разработанного прототипа реактора проведено сравнение продуктов, полученных в результате СВЧ-пиролиза и «традиционного» термического пиролиза торфа, при котором нагрев стенки реактора осуществлялся трубчатым электронагревателем.

Следует также отметить, что большое число исследований по микроволновому пиролизу торфа посвящено получению только одного продукта (из газообразных, жидких или твердых фракций), что снижает производительность предлагаемых технологий. СВЧ-пиролиз позволяет получать широкий спектр продуктов переработки, которые можно использовать в качестве топлива, эффективного сорбента, катализатора, СВЧ-поглотителя, источника наночастиц и др. [17]. В этом аспекте в статье обсуждается разработка системы фракционирования, а также эффективность технологии получения горючих, жидких и твердых фракций и их компонентный анализ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Принципиальная схема проектируемого комплекса для микроволнового пиролиза природного сырья приведена на рис. 1. К задачам этого комплекса относятся переработка органических материалов в различных режимах и получение газообразной и жидкой фракции, а также твердого углеродного остатка. Целью проводимых экспериментов является изучение осо-

бенностей СВЧ-пиролиза торфа и анализ продуктов его переработки.

Спроектированный комплекс позволяет работать в различных режимах, включая высокотемпературный пиролиз (до 1000 °С), в условиях как избыточного, так и пониженного давления в реакторе в зависимости от характеристик перерабатываемого сырья и используемых технологий [18]. В данной серии экспериментов был исследован режим так называемого мягкого пиролиза (термолиза), который реализовывался при температурах ~250–300 °С и пониженном давлении около 0,1 атм. Указанный режим представляется оптимальным, поскольку позволяет обеспечить деструкцию торфа и его глубокую переработку с относительно высокой энергоэффективностью.

Работа комплекса осуществляется следующим образом. Органическое сырье (торф) помещается в теплоизолированную рабочую камеру микроволнового реактора через систему загрузки сырья. После завершения загрузки система управления комплексом активирует систему откачки продуктов реакции, которая удаляет воздух (уменьшая количество кислорода) и избыточную влагу с помощью форвакуумного насоса. Использование системы предварительной откачки позволяет сократить затраты энергии и времени на сушку сырья. Далее давление контролируется и стабилизируется с помощью системы контроля параметров. Для откачки системы, а также длительной непрерывной работы СВЧ-реактора в условиях повышенного загрязнения пиролизным газом в наших экспериментах использовался одноступенчатый водокольцевой форвакуумный насос Pompetravaini TRMB 25-30 GH (Pompetravaini, Италия).

После стабилизации давления система контроля параметров включает управляемый блок высоковольтного питания и приводит в действие один или несколько источников микроволнового излучения (в зависимости от их мощности и количества перерабатываемого топлива). В реакторах, ориентированных на среднюю массу перерабатываемого сырья (до 5 кг), в качестве источников могут использоваться промышленные магне-

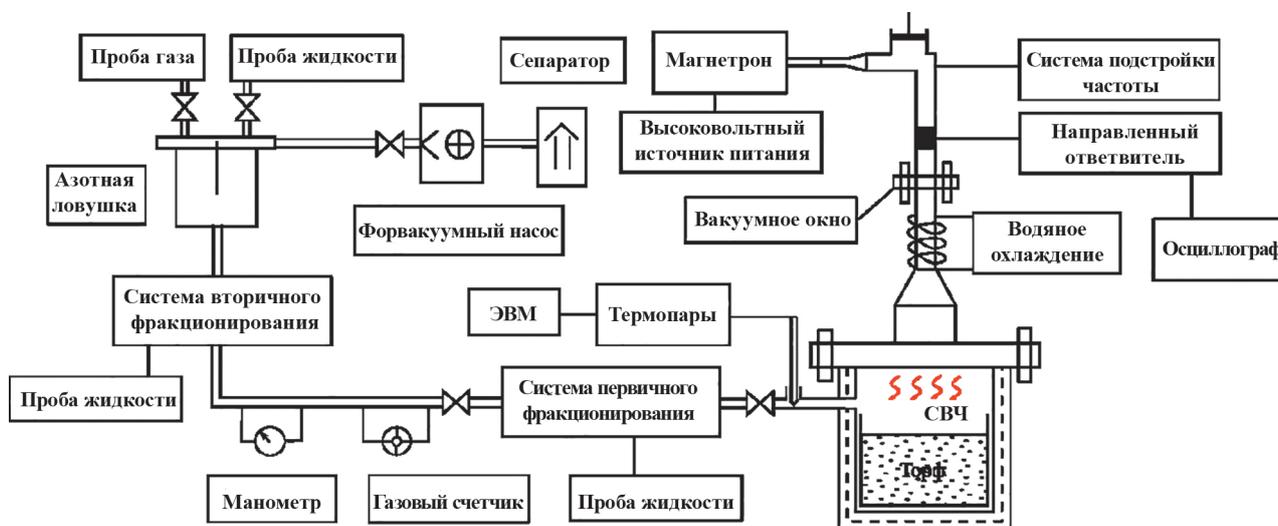


Рис. 1. Принципиальная схема проектируемого комплекса для микроволнового пиролиза природного сырья

Fig. 1. Scheme of the designed complex for microwave pyrolysis of natural raw materials

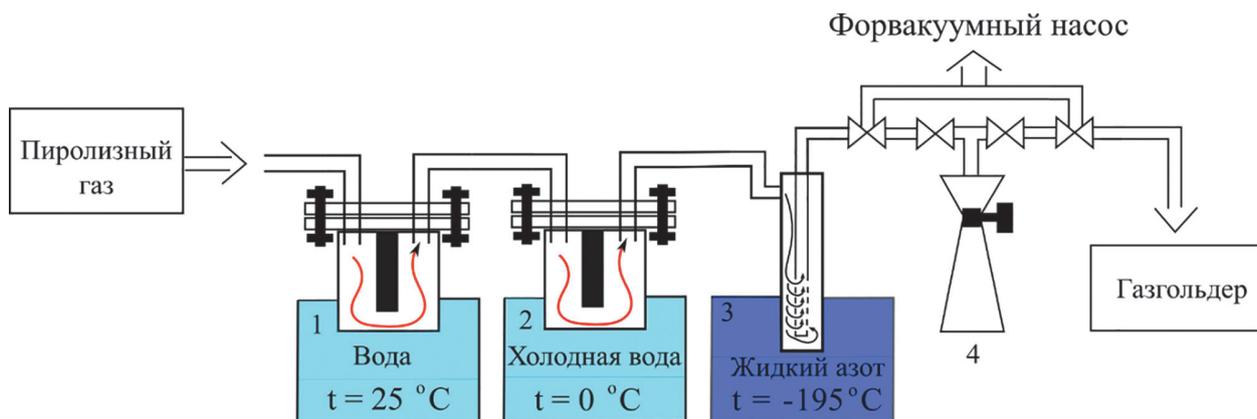


Рис. 2. Схема фракционирования и отбора проб

Fig. 2. Scheme of fractionation and sampling

троны киловаттного уровня мощности. В описанной далее серии экспериментов использовался магнетрон Samsung OM75S-21 2,465 ГГц / 0,9 кВт (Samsung, Китай). Волноводная линия передачи микроволнового излучения оснащена радиопрозрачными барьерными окнами, что позволяет эксплуатировать рабочую камеру при давлении ниже атмосферного, а также эффективно откачивать газообразные и конденсирующиеся жидкие (при стандартных условиях) продукты пиролиза.

При достижении необходимой для иницирования реакции мягкого пиролиза температуры начинается выделение летучих продуктов реакции. Газообразные фракции откачиваются из объема реактора и осаждаются в первичной (1) и вторичной (2) системах фракционирования, а также в поглотителе Рихтера (рис. 2). Системы первичного и вторичного фракционирования представляют собой склянку Тищенко с водой в качестве охлаждающей жидкости. В первом отстойнике осаждаются более тяжелые смолистые фракции, во втором – более летучие соединения. Оставшийся неконденсированный пиролизный газ собирается отдельно в газовый баллон с помощью дополнительной откачного насоса. Во время процесса пиролиза система откачки продуктов реакции (4) позволяет отбирать пробы для контроля качества продуктов реакции и изменять параметры нагрева (при необходимости).

После завершения пиролиза теплоизолированная рабочая камера микроволнового реактора охлаждается в течение некоторого времени, затем давление выравнивается с атмосферным. Углеродсодержащий остаток выгружается через систему выгрузки твердых остатков с помощью скребкового механизма.

Калибровка системы регулировки проводилась в предварительных экспериментах на различных стадиях процесса микроволнового пиролиза в соответствии с изменениями характеристик поглощения сырья. Разработанная система подстройки позволяет минимизировать отражения СВЧ-мощности от реактора при изменении параметров среды в процессе ее нагрева и в результате обеспечить длительную безаварийную работу источников микроволнового излучения.

Следует отметить, что важной особенностью разработанного микроволнового комплекса является возможность его масштабирования для переработки большей массы органических материалов (например, путем

пакетирования). В то же время увеличение объема реактора требует увеличения либо мощности, либо количества используемых СВЧ-источников (либо того и другого). Для обеспечения эффективной передачи энергии в топливо в каждом случае необходима дополнительная оптимизация геометрии реактора.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На базе прототипа разработанного комплекса были проведены эксперименты по микроволновому пиролизу торфа. Был исследован верховой сфагновый торф Греко-Ушаковского месторождения. Эксперименты проводились в режиме мягкого пиролиза (термолиза). При СВЧ-воздействии нагрев осуществлялся в течение 10 мин до температуры около 250 °С, далее данная температура поддерживалась системой контроля параметров путем регулировки мощности источника. Полное время переработки 1 кг торфа составляло около 60 мин. В результате экспериментов по СВЧ-пиролизу наблюдался выход газообразной, смолистой, жидкообразной и твердой фракций в соотношениях около 18, 9,5, 15,5 и 57% соответственно.

Методом хромато-масс-спектрометрии был изучен состав газообразных и жидких продуктов пиролиза торфа, инициированного СВЧ-излучением. Результаты проведенного анализа представлены на рис. 3 (гистограммы синего цвета), показаны основные классы органических соединений и их процентное содержание в продуктах реакции без учета содержания неорганических газов, воды и примесей меньше 0,5 масс.%. Согласно данным измерений методом хромато-масс-спектрометрии, газообразные продукты состоят из непредельных, предельных углеводородов, гетероциклических соединений (см. рис. 3, а). В состав жидких продуктов при СВЧ-переработке торфа преимущественно входят гетероциклические, карбонильные, карбоксильные соединения, спирты, а также фенолы. Основные алифатические газы образуются в результате пиролиза гемицеллюлозы и целлюлозы, а ароматические углеводороды – в результате пиролиза лигнина [19, 20].

Для исходного верхового сфагнового торфа Греко-Ушаковского месторождения и полученного в результате СВЧ-пиролиза твердого остатка была определена энергетическая ценность согласно ГОСТ 147-2013⁴. Верховой

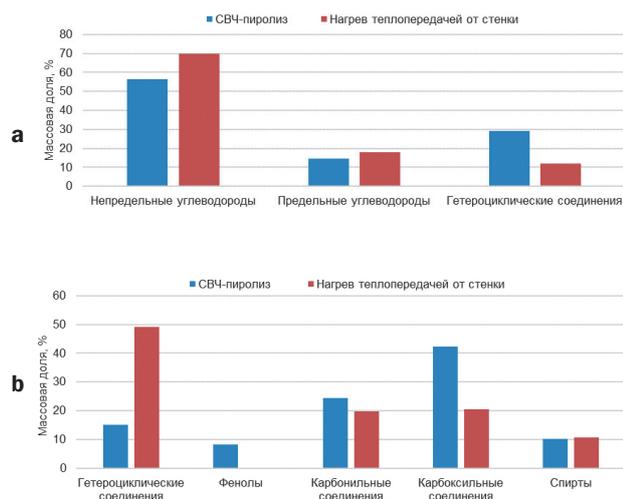


Рис. 3. Сравнительный анализ составов газовой фазы (а) и жидкой фракции (b) продуктов сверхвысокочастотного пиролиза торфа и пиролиза при его нагреве теплопередачей от стенки

Fig. 3. Gas phase (a) and liquid fraction (b) composition of the products of peat microwave pyrolysis and heating by heat transfer from the wall

торф, в отличие от углеродистого остатка, характеризуется более низким значением теплоты сгорания, которая составляет 1987 ккал/кг в сравнении с 6592 ккал/кг.

Одной из основных целей проводимых исследований является изучение особенностей реакции СВЧ-пиролиза в сравнении с его «традиционным» термическим аналогом. В данном аспекте важным является сопоставление продуктов реакции, полученных при различных механизмах нагрева материала. Модельные эксперименты по термическому пиролизу проводились в лабораторном реакторе, нагрев торфа осуществлялся трубчатым электронагревателем через стенки камеры [21]. Как уже обсуждалось выше, механизм нагрева путем теплопередачи/теплопроводности является менее эффективным, поэтому в сравнительных экспериментах в данной схеме пиролиза полное время переработки в том же диапазоне температур доходило до 90 мин.

Результаты экспериментов по термическому пиролизу также приведены на рис. 3 (гистограммы красного цвета). Проведенный анализ продуктов реакции показывает, что процентное содержание непредельных углеводородов, преобладающих в составе пиролизного газа, который получен в результате СВЧ-переработки, ниже по сравнению с нагревом теплопередачей от стенки реактора (разница составляет 13%). Значительное количество предельных углеводородов (~18% масс.) входит в состав газовой фазы, образующейся при тепловом нагреве трубчатым электронагревателем. В то же время в жидких продуктах реакции в случае микроволновой переработки происходит увеличение содержания карбоксильных соединений и уменьшение ароматических углеводородов.

Результаты проведенных экспериментов хорошо согласуются с предшествующими исследованиями и демонстрируют глубокую переработку торфа в условиях мягкого СВЧ-пиролиза с высоким выходом полезных продуктов за счет более эффективной передачи тепла, равномерного нагрева материала и оптимальной скорости реакции. Важно отметить, что указанный режим глубокой переработки был получен при повышенном объеме загрузки обрабатываемого материала с сохранением процентного выхода смолистых и газообразных фракций.

В ходе экспериментов было продемонстрировано высокое удельное газовыделение во время реакции пиролиза при СВЧ-воздействии. Полученный пиролизный газ, содержащий метан, может быть в дальнейшем использован для выработки тепловой энергии (с последующим преобразованием в электрическую), а также в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания. В результате энергетическая эффективность пиролиза может быть значительно повышена за счет использования энергии, полученной при сжигании выделяющихся газов. Можно отметить, что достаточно интенсивное высокотемпературное горение наблюдалось при тестовом поджигании газа на выходе из газгольдерной системы реактора. Кроме того, пиролизный газ может быть использован в качестве исходного материала для цепочки последовательных технологических процессов получения насыщенных ациклических углеводородов, синтетических полимеров, а также в качестве источника водорода [22].

Торфяная смола, полученная в результате пиролиза, представляет собой сложную смесь химических соединений, включая одноатомные и многоатомные фенолы и сложные эфиры фенолов, воски и парафины, жирные кислоты, спирты и масла, альдегиды и кетоны [23].

Углеродный остаток (полукокс) с содержанием чистого углерода до 80% представляет интерес для различных областей производства, включая изготовление электродов для алюминиевой промышленности, новых аллотропных модификаций углерода (нанотрубки, фуллерены), углеродного волокна и др. [24]. Кроме того, данная технология переработки торфа также может быть использована для производства гидрофобного торфяно-минерального сорбента, который эффективно используется для сорбции разливов нефти при ликвидации последствий техногенных аварий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработан энергоэффективный комплекс для низкотемпературного (мягкого) микроволнового пиролиза органических материалов в условиях пониженного давления. Конструкция комплекса обеспечивает равномерный нагрев сырья, сокращает время процесса переработки и увеличивает выход твердого продукта.

Разработанный комплекс способен обеспечить глубокую переработку органических топлив (в частности, торфа) в нефтепоглощающие сорбенты и другие жидкие и газообразные продукты, востребованные в промыш-

¹ГОСТ 147-2013. Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низ-шей теплоты сгорания // Консорциум «Кодекс». Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200107606?ysclid=lv3dl3v2v956320346> (дата обращения: 05.10.2023)

ленности. Разработанная технология позволяет получать сырье для широкого спектра высокотехнологичных промышленных производств.

Предлагаемая конструкция реактора позволяет проводить лабораторные исследования широкого

спектра органических материалов, а при увеличении мощности и соответствующем «масштабировании» может быть использована в нефтехимии, теплоэнергетике, сельском хозяйстве и других отраслях промышленности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hakizimana J.D.K., Kim H.-T. Peat briquette as an alternative to cooking fuel: a techno-economic viability assessment in Rwanda // *Energy*. 2016. Vol. 102. P. 453–464. DOI: 10.1016/j.energy.2016.02.073.
2. Arpia A.A., Chen W.-H., Lam S.S., Rousset P., de Luna M.D.G. Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: a comprehensive review // *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 403. P. 126233. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126233.
3. Mushtaq F., Mat R., Ani F.N. A review on microwave assisted pyrolysis of coal and biomass for fuel production // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 39. P. 555–574. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.073.
4. Demirbas A., Arin G. An overview of biomass pyrolysis // *Energy Sources*. 2002. Vol. 24, no. 5. P. 471–482. DOI: 10.1080/00908310252889979.
5. Бердоносков С.С. Микроволновая химия // *Сороковский образовательный журнал*. 2001. Т. 7. N 1. С. 32–38.
6. Кузнецов Д.В., Раев В.А., Куранов Г.Л., Арапов О.В., Костиков Р.Р. Применение микроволнового излучения в синтезе органических соединений // *Журнал общей химии*. 2005. Т. 41. N 12. С. 1757–1787. EDN: OYQPTV.
7. Mgbemena C.O., Li D., Lin M.-F., Liddel P.D., Katnam K.B., Thakur V.K., et al. Accelerated microwave curing of fibre-reinforced thermoset polymer composites for structural applications: a review of scientific challenges // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. Vol. 115. P. 88–103. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.09.012.
8. Морозов О.Г., Самигуллин Р.Р., Насыбуллин А. Р. Микроволновые технологии в процессах переработки и утилизации бытовых полимерных отходов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2010. Т. 12. N 4-3. С. 580–582. EDN: NXJUTZ.
9. Foong S.Y., Liew R.K., Yang Y., Cheng Y.W., Yek P.N.Y., Wan Mahari W.A., et al. Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: Progress, challenges, and future directions // *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 389. P. 124401. DOI: 10.1016/j.cej.2020.124401.
10. Patel A., Agrawal B., Rawal B.R. Pyrolysis of biomass for efficient extraction of biofuel // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2020. Vol. 42, no. 13. P. 1649–1661. DOI: 10.1080/15567036.2019.1604875.
11. Fernandez A., Palacios C., Echegaray M., Mazza G., Rodriguez R. Pyrolysis and combustion of regional agro-industrial wastes: thermal behavior and kinetic parameters comparison // *Combustion Science and Technology*. 2018. Vol. 190, no. 1. P. 114–135. DOI: 10.1080/00102202.2017.1377701.
12. Dupont C., Chiriach R., Gauthier G., Toche F. Heat capacity measurements of various biomass types and pyrolysis residues // *Fuel*. 2014. Vol. 115. P. 644–651. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.07.086.
13. Karimi M., Aminzadehsarikhanbeglou E., Vaferi B. Robust intelligent topology for estimation of heat capacity of biochar pyrolysis residues // *Measurement*. 2021. Vol. 183. P. 109857. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109857.
14. Li F., Feng J., Zhang H., Li W.-Y. Particle-scale heat and mass transfer processes during the pyrolysis of millimeter-sized lignite particles with solid heat carriers // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 219. P. 119372. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119372.
15. Sharifzadeh M., Sadeqzadeh M., Guo M., Borhani T.N., Murthy Konda N.V.S.N., Garcia M.C., et al. The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2019. Vol. 71. P. 1–80. DOI: 10.1016/j.peccs.2018.10.006.
16. Papari S., Hawboldt K. A review on the pyrolysis of woody biomass to bio-oil: focus on kinetic models // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 52. P. 1580–1595. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.191.
17. Kan T., Strezov V., Evans T.J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: a review of product properties and effects of pyrolysis parameters // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 57. P. 1126–1140. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.185.
18. Пат. № 2737007, Российская Федерация, НО5В 6/64. Комплекс для микроволнового пиролиза органических материалов / Н.Ю. Песков, Т.О. Крапивницкая, Д.И. Соболев, М.Ю. Глявин, А.Н. Денисенко. Заявл. 29.06.2020; опубл. 24.11.2020. Бюл. № 33.
19. Исламова С.И., Тимофеева С.С., Хаматгалимов А.Р., Ермолаев Д.В. Кинетический анализ термического разложения низинного и верхового торфа // *Химия твердого топлива*. 2020. № 3. С. 32–41. DOI: 10.31857/S0023117720030044. EDN: UASEBA.
20. Крапивницкая Т.О., Ананичева С.А., Алыева А.Б., Вихарев А.А., Глявин М.Ю., Денисенко А.Н. [и др.]. Сравнительные эксперименты по микроволновой и термической деструкции торфа в лабораторных установках с малым объемом загрузки // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2023. Т. 1. С. 565–568. EDN: ZYESIH.
21. Bogdashov A.A., Denisenko A.N., Glyavin M.Yu., Krapivnitskaia T.O., Peskov N.Yu., et al. Experimental study of the dynamics of microwave pyrolysis of peat // *ITM Web of Conferences*. 2019. Vol. 30. P. 12006. DOI: 10.1051/itmconf/20193012006.
22. Krapivnitskaia 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*. 2017. Vol. 149. P. 02023. DOI: 10.1051/epjconf/201714902023.
23. Zhang J., Tahmasebi A., Omoriyekomwan J.E., Yu J. Production of carbon nanotubes on bio-char at low temperature via microwave-assisted CVD using Ni catalyst // *Diamond and Related Materials*. 2019. Vol. 91. P. 98–106. DOI: 10.1016/j.diamond.2018.11.012.

REFERENCES

1. Hakizimana J.D.K., Kim H.-T. Peat briquette as an alternative to cooking fuel: a techno-economic viability assessment in Rwanda. *Energy*. 2016;102:453-464. DOI: 10.1016/j.energy.2016.02.073.
2. Arpia A.A., Chen W.-H., Lam S.S., Rousset P., de Luna M.D.G. Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: a comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*. 2021;403:126233. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126233.
3. Mushtaq F., Mat R., Ani F.N. A review on microwave assisted pyrolysis of coal and biomass for fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;39:555-574. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.073.
4. Demirbas A., Arin G. An overview of biomass pyrolysis. *Energy Sources*. 2002;24(5):471-482. DOI: 10.1080/00908310252889979.
5. Berdonosov S.S. Microwave chemistry. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal*. 2001;7(1):32-38. (In Russian).
6. Kuznetsov D.V., Raev V.A., Kuranov G.L., Arapov O.V., Kostikov R.R. Microwave radiation appliance for synthesis of organic substances. *Zhurnal obshchei khimii*. 2005;41(12):1757-1787. (In Russian). EDN: OYQPTV.
7. Mgbemena C.O., Li D., Lin M.-F., Liddel P.D., Katnam K.B., Thakur V.K., et al. Accelerated microwave curing of fibre-reinforced thermoset polymer composites for structural applications: a review of scientific challenges. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018;115:88-103. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.09.012.
8. Morozov O.G., Samigullin R.R., Nasybullin A.R. Microwave technologies in processes of processing and recycling household polymeric waste. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010;12(4-3):580-582. (In Russian). EDN: NXJUTZ.
9. Foong S.Y., Liew R.K., Yang Y., Cheng Y.W., Yek P.N.Y., Wan Mahari W.A., et al. Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: Progress, challenges, and future directions. *Chemical Engineering Journal*. 2020;389:124401. DOI: 10.1016/j.cej.2020.124401.
10. Patel A., Agrawal B., Rawal B.R. Pyrolysis of biomass for efficient extraction of biofuel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2020;42(13):1649-1661. DOI: 10.1080/15567036.2019.1604875.
11. Fernandez A., Palacios C., Echegaray M., Mazza G., Rodriguez R. Pyrolysis and combustion of regional agro-industrial wastes: thermal behavior and kinetic parameters comparison. *Combustion Science and Technology*. 2018;190(1):114-135. DOI: 10.1080/00102202.2017.1377701.
12. Dupont C., Chiriach R., Gauthier G., Toche F. Heat capacity measurements of various biomass types and pyrolysis residues. *Fuel*. 2014;115:644-651. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.07.086.
13. Karimi M., Aminzadehsarikhanbeglou E., Vaferi B. Robust intelligent topology for estimation of heat capacity of biochar pyrolysis residues. *Measurement*. 2021;183:109857. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109857.
14. Li F., Feng J., Zhang H., Li W.-Y. Particle-scale heat and mass transfer processes during the pyrolysis of millimeter-sized lignite particles with solid heat carriers. *Applied Thermal Engineering*. 2023;219:119372. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119372.
15. Sharifzadeh M., Sadeqzadeh M., Guo M., Borhani T.N., Murthy Konda N.V.S.N., Garcia M.C., et al. The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2019;71:1-80. DOI: 10.1016/j.pecs.2018.10.006.
16. Papari S., Hawboldt K. A review on the pyrolysis of woody biomass to bio-oil: focus on kinetic models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;52:1580-1595. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.191.
17. Kan T., Strezov V., Evans T.J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: a review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;57:1126-1140. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.185.
18. Peskov N.Yu., Peskov N.Yu., Krapivnitskaya T.O., Sobolev D.I., Glyavin M.Yu., Denisenko A.N. *Complex for microwave pyrolysis of organic materials*. Patent RF, no. 2737007; 2020. (In Russian).
19. Islamova S.I., Timofeeva S.S., Khamatgalimov A.R., Ermolaev D.V. Kinetic analysis of the thermal decomposition of lowland and high-moor peats. *Khimiya tverdogo topliva*. 2020;3:32-41. (In Russian). DOI: 10.31857/S0023117720030044. EDN: UASEBA.
20. Krapivnitskaya T.O., Ananicheva S.A., Alyeva A.B., Vikharev A.A., Glyavin M.Yu., Denisenko A.N., et al. Comparative experiments on microwave and thermal destruction of peat in laboratory installations with a small loading volume. *Elektronika i mikroelektronika SVCh*. 2023;1:565-568. (In Russian). EDN: UASEBA.
21. Bogdashov A.A., Denisenko A.N., Glyavin M.Yu., Krapivnitskaia T.O., Peskov N.Yu., et al. Experimental study of the dynamics of microwave pyrolysis of peat. *ITM Web of Conferences*. 2019;30:12006. DOI: 10.1051/itmconf/20193012006.
22. Krapivnitskaia 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*. 2017;149:02023. DOI: 10.1051/epjconf/201714902023.
23. Zhang J., Tahmasebi A., Omoriyekomwan J.E., Yu J. Production of carbon nanotubes on bio-char at low temperature via microwave-assisted CVD using Ni catalyst. *Diamond and Related Materials*. 2019;91:98-106. DOI: 10.1016/j.diamond.2018.11.012.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Крапивницкая Татьяна Олеговна,
ведущий инженер,
Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
аспирант,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1,
Российская Федерация,
✉ kto@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4020-7482>

Ананичева Светлана Андреевна,
младший научный сотрудник,
Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
аспирант,
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского,
603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23,
Российская Федерация,
bulanova@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4008-3328>

Альева Алиса Биняминовна,
к.х.н., научный сотрудник,
Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
a.alieva@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3749-7738>

Вихарев Александр Анатольевич,
к.ф.-м.н., заместитель заведующего
отделом по научной работе,
Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
alvikharev@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2647-842X>

Песков Николай Юрьевич,
д.ф.-м.н., профессор РАН,
заведующий лабораторией,
Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
доцент,
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского,
603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23,
Российская Федерация,
peskov@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4220-6608>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatiana O. Krapivnitckaia,
Leading Engineer,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
Postgraduate Student,
Ufa State Petroleum Technical University,
1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064,
Russian Federation,
✉ kto@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4020-7482>

Svetlana A. Ananicheva,
Junior Researcher,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
Postgraduate Student,
Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod,
23, Gagarin Ave., Nizhniy Novgorod, 603022,
Russian Federation,
bulanova@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4008-3328>

Alisa B. Alyeva,
Cand. Sci. (Chemistry), Researcher,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
a.alieva@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3749-7738>

Alexander A. Vikharev,
Cand. Sci. (Physics and Mathematics),
Deputy Head of the Department for Scientific Work,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
alvikharev@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2647-842X>

Nikolai Yu. Peskov,
Dr. Sci. (Physics and Mathematics),
Professor of Russian Academy of Sciences,
Head of Laboratory,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
Associate Professor,
Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod,
23, Gagarin Ave., Nizhniy Novgorod, 603022,
Russian Federation,
peskov@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4220-6608>

Денисенко Андрей Николаевич,
ведущий конструктор,
Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
androu@ipfran.ru
<https://orcid.org/0009-0002-2765-252X>

Глявин Михаил Юрьевич,
д.ф.-м.н., заместитель директора учреждения
по научной работе, заведующий отделом,
Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
glyavin@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7896-9212>

Зеленцов Сергей Васильевич,
д.х.н.,
старший научный сотрудник,
Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
профессор,
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского,
603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23,
Российская Федерация,
zelentsov@chem.unn.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1534-5306>

Шулаев Николай Сергеевич,
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой,
Институт химических технологий и инжиниринга
Уфимского государственного нефтяного
технического университета
(филиал в г. Стерлитамаке),
453118, г. Стерлитамак, пр. Октября, 2,
Российская Федерация,
nshulaev@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3595-6948>

Andrey N. Denisenko,
Leading Designer,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
androu@ipfran.ru
<https://orcid.org/0009-0002-2765-252X>

Mikhail Yu. Glyavin,
Dr. Sci. (Physics and Mathematics),
Deputy Director for Scientific Efforts,
Head of the Department,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
glyavin@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7896-9212>

Sergei V. Zelentsov,
Dr. Sci. (Chemistry),
Senior Researcher,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
Professor,
Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod,
23, Gagarin Ave., Nizhniy Novgorod, 603022,
Russian Federation,
zelentsov@chem.unn.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1534-5306>

Nikolai S. Shulaev,
Dr. Sci. (Engineering.), Professor,
Head of the Department,
Institute of Chemical Technologies and Engineering
of Ufa State Petroleum Technical University
(Sterlitamak Branch),
2, Oktyabrya Ave., Sterlitamak, 453118,
Russian Federation,
nshulaev@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3595-6948>

Вклад авторов

Т.О. Крапивницкая – проведение экспериментов.
С.А. Ананичева – проведение анализов.
А.Б. Алыева – подготовка публикации.
А.А. Вихарев – обработка полученных данных.
Н.Ю. Песков – разработка концепции исследования.
А.Н. Денисенко – проведение экспериментов.
М.Ю. Глявин – разработка концепции исследования.
С.В. Зеленцов – развитие методологии.
Н.С. Шулаев – обсуждение результатов.

Contribution of the authors

Tatiana O. Krapivnitckaia – conducting experiments.
Svetlana A. Ananicheva – conducting analyses.
Alisa B. Alyeva – preparing the manuscript.
Alexander A. Vikharev – data processing.
Nikolai Yu. Peskov – research concept development.
Andrey N. Denisenko – conducting experiments.
Mikhail Yu. Glyavin – research concept development.
Sergey V. Zelentsov – methodology development.
Nikolai S. Shulaev – results discussion.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 13.10.2023.
Одобрена после рецензирования 01.12.2023.
Принята к публикации 31.05.2024.

Conflict 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.

Information about the article

The article was submitted 13.10.2023.
Approved after reviewing 01.12.2023.
Accepted for publication 31.05.2024.