ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 66.086
EDN: BWZUXR
DOI: 10.21285/achb.1003

Микроволновый пиролиз древесины дуба: исследование процесса и характеристика продуктов

А.Б. Алыева*,, С.А. Ананичева*, Т.О. Крапивницкая*✉, А.Н. Денисенко*, А.А. Ананичев*, Е.И. Преображенский*, Д.А. Широков**, М.Ю. Глявин*, Н.Ю. Песков***

**Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Российская Федерация*
***Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация*

Аннотация. *Развитие методов конверсии сельскохозяйственных отходов в ценные химические продукты является актуальной задачей, направленной на повышение эффективности использования природных ресурсов. Пиролиз с применением микроволнового излучения представляет собой перспективный подход, характеризующийся высокой скоростью нагрева, селективностью воздействия и потенциалом для масштабирования. Для реализации микроволновой обработки древесины дуба была разработана специализированная технологическая установка, ключевым элементом которой является микроволновый реактор с объем загрузки сырья до 3 л. В рамках настоящего исследования было проведено сопоставление инфракрасных спектров древесины дуба до и после воздействия микроволнового излучения, а также полученной газообразной фракции. Анализ инфракрасных спектров исходной древесины и твердого остатка после пиролиза позволил оценить изменения в структуре полимерных компонентов древесины (целлюлозы, лигнина, гемицеллюлоз), а анализ инфракрасного спектра газовой фракции – идентифицировать основные газообразные продукты реакции. Дополнительно был проведен элементный анализ древесины дуба и твердого продукта его микроволновой переработки. Полученные данные свидетельствуют о том, что в ходе процесса пиролиза древесины атомные отношения H/C и O/C уменьшаются на 0,73 и 0,44 соответственно. Расчетная теплотворная способность твердого остатка при этом повысилась в 2 раза, что свидетельствует о перспективности использования продукта пиролиза в качестве топлива благодаря увеличению энергетической ценности. Полученные результаты указывают на перспективность применения микроволнового пиролиза для переработки сельскохозяйственных отходов в высокоуглеродистые материалы с повышенной теплотворной способностью.*

Ключевые слова: *переработка органического сырья, древесина, микроволновый пиролиз, уголь, микроволновый реактор*

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: Алыева А.Б., Ананичева С.А., Крапивницкая Т.О., Денисенко А.Н., Ананичев А.А., Преображенский Е.И. [и др.]. Микроволновый пиролиз древесины дуба: исследование процесса и характеристика продуктов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. N 4. DOI: 10.21285/achb.1003. EDN: BWZUXR.

© Алыева А.Б., Ананичева С.А., Крапивницкая Т.О., Денисенко А.Н., Ананичев А.А., Преображенский Е.И., Широков Д.А., Глявин М.Ю., Песков Н.Ю., 2025

CHEMICAL TECHNOLOGY

Original article

Microwave pyrolysis of oak wood: Process analysis and product characterization

Alisa B. Alyeva*,, Svetlana A. Ananicheva*, Tatiana O. Krapivnitckaia*✉, Andrey N. Denisenko*, Andrey A. Ananichev*, Evgenii I. Preobrazhensky*, Dmitriy A. Shirokov**, Mikhail Yu. Glyavin*, Nikolay Yu. Peskov***

**A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhniy Novgorod, Russian Federation*
***Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

Abstract. *Development of methods for converting agricultural waste into valuable chemical products constitutes an important task designed to improve the efficiency of natural resource use. A promising approach is microwave-assisted pyrolysis, which offers high heating rates, selective action, and potential for scaling. In order to implement microwave processing of oak wood, a specialized processing unit was developed; its key element is a microwave reactor with a capacity of up to 3 L. The present study compared the IR spectra of oak wood prior to and after exposure to microwave radiation, as well as that of the obtained gaseous fraction. The IR spectrum analysis of the original wood and the solid residue from pyrolysis revealed structural changes in the polymer components of wood (cellulose, lignin, and hemicelluloses), while the IR spectrum analysis of the gaseous fraction helped identify the main gaseous reaction products. In addition, an elemental analysis of oak wood and the solid product of its microwave processing was conducted. The obtained data indicate a decrease in H/C and O/C atomic ratios by 0.73 and 0.44, respectively, during wood pyrolysis. The estimated calorific value of the solid residue increased twofold, which suggests the potential of using pyrolysis products as fuel due to the increased energy value. The obtained results indicate the potential of microwave pyrolysis in the conversion of agricultural waste into high-carbon materials with increased calorific value.*

Keywords: *processing of organic raw materials, wood, microwave pyrolysis, coal, microwave reactor*

Funding. *The work was carried out with the financial support of a grant from the Russian Science Foundation (project no. 23-19-00763 "Development of new physical and chemical technologies and microwave complexes for deep processing of cellulose-containing materials").*

For citation: Alyeva A.B., Ananicheva S.A., Krapivnitckaia T.O., Denisenko A.N., Ananichev A.A., Preobrazhensky E.I., et al. Microwave pyrolysis of oak wood: Process analysis and product characterization. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology.* 2025;15(4). (In Russian). DOI: 10.21285/achb.1003. EDN: BWZUXR.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость снижения выбросов углекислого газа обуславливает увеличение доли возобновляемых источников энергии, в частности биомассы, обладающей значительным энергетическим потенциалом вследствие ее возобновляемости и высокого содержания углерода [1]. Теоретический годовой потенциал биомассы в России, включая агробиомассу, превышает 100 млн т.н.э., значительную долю в котором составляют отходы лесной промышленности (11–13 млн т.н.э. в год в начале XXI века [2]). Общий объем древесных отходов в настоящее время оценивается в 84–124 млн м^3 в год (около 14–21 млн т.н.э.) и, по прогнозам, к 2030 году возрастет до 100–189 млн м^3 в год (18–34 млн т.н.э.) [2]. Основным компонентом необработанной древесины является вода, но в пересчете на сухую массу основную часть составляют углеводы (65–75%), которые связаны с лигнином (18–35%). В целом сухая древесина имеет следующий элементный состав: около 50% углерода, 6% водорода, 44% кислорода и следовые количества неорганических веществ [3].

В контексте возрастающей экологической и экономической значимости эффективного управления отходами термохимические методы, в частности пиролиз, рассматриваются как перспективные технологии переработки лигноцеллюлозной биомассы [4]. Пиролиз, заключающийся в термической деструкции органического сырья в инертной среде, позволяет получать углеродистый остаток (биоуголь), биомасло и газ. Биоуголь находит применение в различных областях, включая улучшение плодородия почв [5], сорбцию дымовых газов [6] и металлургию [7]. Микроволновый пиролиз за счет объемного нагрева и снижения затрат представляет собой перспективную технологию оптимизации данного процесса. Несмотря на исследования микроволнового пиролиза древесных гранул [8, 9], данные о масштабировании технологии для переработки биомассы остаются ограниченными, при этом промышленные разработки сконцентрированы на сушильных установках [10]. Попытки масштабирования реакторов для глубокой переработки [11, 12] не получили широкого освещения в научной литературе.

В связи с этим настоящее исследование направлено на изучение состава продуктов микроволнового пиролиза древесины дуба в разработанном сверхвысокочастотном (СВЧ) реакторе с загрузкой до 3 л с целью развития представлений о механизмах пиролиза и создания основы для промышленных технологий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования являлись образцы сердцевины дуба (Томская область, Россия). Древесина была предварительно подготовлена путем измельчения до формы брусков размером 5×5×3 см. Общая масса брусков, помещенных в реактор, составила 2 кг.

Для проведения экспериментов по СВЧ-пиролизу был разработан макет реактора, конструктивные особенности которого представлены на рис. 1. Данная конструкция рассчитана на переработку до 3 л органического сырья. Экспериментальная установка включала в себя промышленный магнетрон (2,45 ГГц / 800 Вт, выходная мощность ~400 Вт), оснащенный специализированной системой электропитания и водяным охлаждением. Форвакуумный насос обеспечивал непрерывную откачку газовой фазы из реакционного объема и поддержание остаточного давления на уровне ~0,1 атм. Выходящие из реактора газы охлаждались до комнатной температуры в теплообменнике, после чего с помощью газового счетчика измерялся их объем. Для последующего анализа газообразные продукты собирались в азотной ловушке. Конденсирующиеся продукты пиролиза собирались в системе фракционирования, оборудованной резервуаром с ледяным охлаждением (с добавлением воды). Длительность СВЧ-воздействия составляла 90 мин. По завершении процесса проводилось определение массы твердой и жидкой фракций.

Для идентификации продуктов пиролиза проводили инфракрасный (ИК) анализ твердых и газообразных образцов с использованием ИК-Фурье спектрометра FT-801 (СИМЕКС, Россия) с приставкой НПВО (для твердых образцов) и герметичной кюветой (для газовых) в диапазоне 500–4000 см$^{-1}$. Твердые образцы предварительно измельчали и спрессовывали в таблетки. Анализ газообразных образцов проводили в герметичной кювете с регистрацией опорного спектра. Элементный анализ (C, H, N, S, O) древесины дуба и углеродистого остатка выполняли на CHNS/O-анализаторе (EMA 502, VELP, Италия) с использованием 2 мг порошковых образцов, высушенных до содержания влаги менее 1%. Сжигание проводили при 1030 °C. Весь материал, содержащийся внутри анализатора, разлагается на элементарные газообразные компоненты. Такие компоненты, как CO_2, N_2, H_2O, SO_2, CO, обнаруживаются при помощи термокондуктометрического детектора.

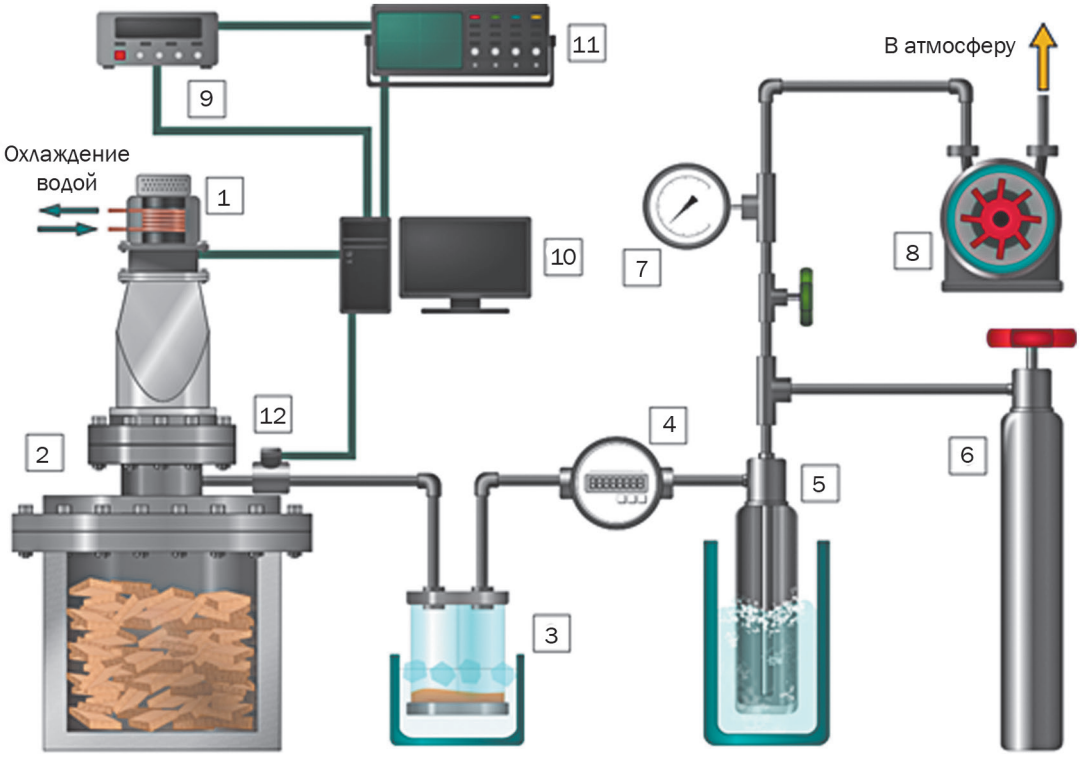

Рис. 1. Схема микроволнового комплекса для пиролиза: 1 – магнетрон; 2 – реактор; 3 – жидкостный отстойник; 4 – газовый счетчик; 5 – отстойник газа; 6 – пробоотборник газа; 7 – манометр; 8 – форвакуумный насос; 9 – высоковольтный источник питания; 10 – компьютерная система управления; 11 – осциллограф; 12 – термопара

Fig. 1. Scheme of microwave complex for pyrolysis: 1 – magnetron; 2 – reactor; 3 – liquid settler; 4 – gas meter; 5 – gas settler; 6 – gas sampler; 7 – pressure gauge; 8 – vacuum pump; 9 – high-voltage power source; 10 – computer control system; 11 – oscilloscope; 12 – thermocouple

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате пиролиза получены твердая (74,5% масс.), жидкая (11,0% масс.) и газообразная (14,5% масс.) фракции. Неоднородный цвет твердого остатка обусловлен неравномерным распределением электромагнитного поля и образованием «горячих точек» [13–15] вследствие низкой теплопроводности древесины дуба (0,35–0,42 Вт/м×К вдоль волокон, 0,20–0,21 Вт/м×К поперек волокон). Для разработки технологии утилизации отходов необходимо минимизировать образование локальных перегревов с целью получения однородного высокоуглеродистого продукта.

С целью изучения механизмов диэлектрического нагрева и визуализации распределения температуры эксперимент был прерван на промежуточной стадии пиролиза с последующим извлечением образца древесины. При этом наблюдали сохранение формы бруска (5×5×3 см) с почернением центральной части, что указывает на обратный температурный градиент (от центра к поверхности). Это способствует перемещению первичных летучих веществ из центра к поверхности и снижению нежелательных вторичных реакций. В ходе высокотемпературного нагрева возможны процессы коксования в полиароматические соединения. Недавние исследования микроволнового нагрева [16, 17] также продемонстрировали это уникальное распределение температуры. Но поскольку газ, образующийся в сердцевине древесины, перемещается через секцию с более низкой температурой, нежелательные вторичные реакции уменьшаются.

В результате эксперимента было получено 4% газообразной фракции, 12% жидкой фракции и 84% твердого углеродистого остатка, то есть средняя относительная скорость конверсии твердого продукта составила 0,17% масс./мин. Процентный выход жидкой фракции характеризует в первую очередь снижение влажности древесины после микроволновой переработки. Доминирующий выход твердого остатка свидетельствует о неполной конверсии исходного сырья.

На рис. 2 приведены результаты исследования древесины дуба и продуктов его микроволнового пиролиза методом ИК-спектроскопии. Стоит отметить, что одной из составных частей древесины является природный полимер лигнин. Известно, что лигнин в лиственных породах состоит из гваяцилпропановых и сирингилпропановых структурных единиц, в то время как в хвойных породах присутствуют только гваяцилпропановые единицы.

ИК-спектроскопическое исследование исходной древесины дуба (см. рис. 2, *a*) и продуктов микроволнового пиролиза позволило идентифицировать структурные изменения, произошедшие в ходе процесса. Ранее авторы работ [18, 19] в спектре древесины дуба отмечали характеристические полосы, соответствующие сирингилпропановым единицам лигнина (1591, 1417, 1321, 1224 см$^{-1}$). Полоса поглощения 1591 см$^{-1}$ соответствовала валентным колебаниям карбоксильной связи *пара*-замещенных фенолов сирингилпропановых колец. Ранее также было показано [20], что широкая полоса 1224 см$^{-1}$ отражала скелетные колебания С-С связей сирингильных колец и валентные колебания С-О в фенолах. В спектре углеродистого остатка (см. рис. 2, *b*) наблюдалось снижение интенсивности полос, особенно в области 1016 см$^{-1}$ (валентные колебания С-О), что указывает на распад компонентов по лабильной С-О связи. На рис. 2, *c* представлен ИК-спектр газообразной фракции, демонстрирующий наличие воды (1250–1600 и 3500–3700 см$^{-1}$), углекислого газа (615–730, 2280–2380, 3590–3650 и 3675–3750 см$^{-1}$), а также незначительные полосы метильных и метиленовых алифатических углеводородов (2800–3000 см$^{-1}$), метана и угарного газа. Таким образом, газовая фракция содержала водяные пары, углекислый газ и углеводороды. Жидкая фракция представляла собой в основном воду и легкокипящие кислородсодержащие органические соединения.

Элементный анализ древесины дуба и твердого продукта (таблица) выявил высокое содержание углерода и кислорода, характерное для лигнина, целлюлозы и

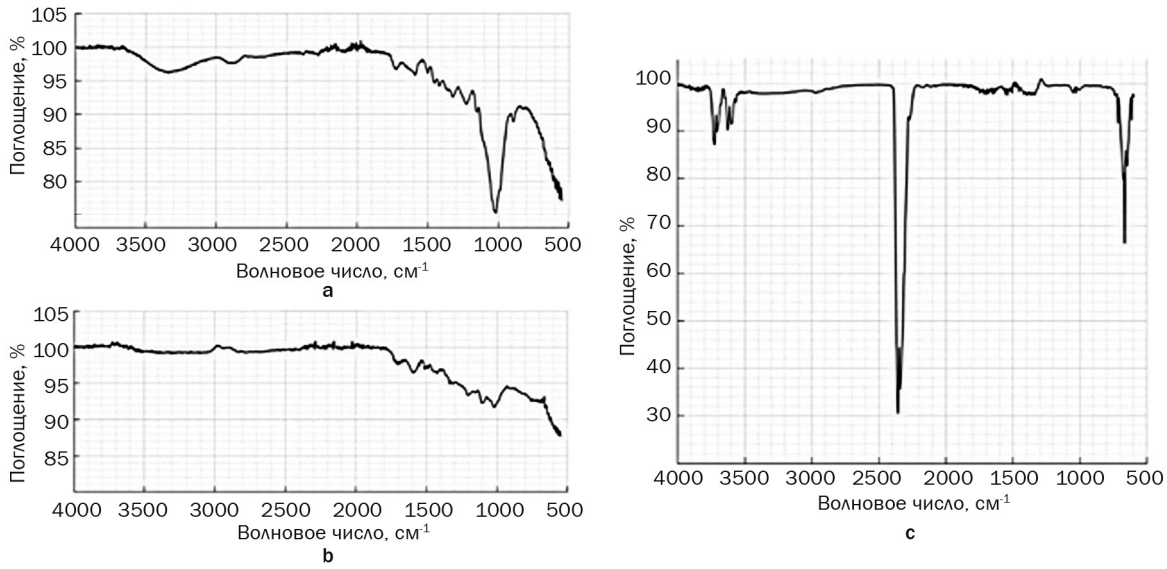

Рис. 2. Инфракрасные спектры древесины дуба (a), углеродистого остатка (b) и газового пиролизата (c)

Fig. 2. Infrared spectra of oak wood (a), carbon residue (b) and gas pyrolysate (c)

гемицеллюлозы. В ходе пиролиза наблюдалось уменьшение атомных отношений H/C (с 1,65 до 0,92) и O/C (с 0,93 до 0,49), что свидетельствует о дегидратации и декарбоксилировании. Содержание серы в обоих образцах было ниже предела обнаружения (<0,3 %).

Элементный анализ дубовых опилок и его углеродистого остатка, полученного микроволновым пиролизом

Elemental analysis of oak sawdust and its carbon residue obtained by microwave pyrolysis

Параметр	Древесина дуба	Углеродистый остаток
C, %	41,9±1,4	57,0±1,4
H, %	5,8±0,2	4,4±0,2
N, %	1,1±0,1	1,1±0,1
O, %	51,0±3,0	37,4±2,2
S, %	менее 0,3	менее 0,3
H/C	1,65	0,93
O/C	0,92	0,49

На основе полученных показателей в массовых процентах содержания ω углерода, водорода, азота и кислорода в древесине до и после пиролиза была рассчитана теплота сгорания Q по формуле С.А. Алиева[1]:

$$Q = 90 \times \omega(\mathrm{C},\%) + 34{,}4 \times \omega(\mathrm{H},\%) - \\ -50 \times (0{,}87 \times \omega(\mathrm{O},\%) - 4 \times \omega(\mathrm{N},\%)).$$

Расчет показал увеличение теплоты сгорания с 1972,0 ккал/кг (древесина) до 3874,5 ккал/кг (углеродистый остаток), что свидетельствует о двукратном повышении теплотворной способности.

Для определения энергетической эффективности низкотемпературного микроволнового пиролиза были определены энергетические затраты на процесс при переработке 2 кг древесины. Общее потребление электроэнергии от сети при времени воздействия 90мин составило 0,6 кВт×ч. Энергетические затраты на переработку килограмма древесины равнялись 1,1 МДж/кг. Хотя расчет показывает относительно высокие энергетические затраты, возможности для оптимизации процесса и масштабирования на промышленный уровень существуют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе проведенной работы исследовано влияние микроволнового воздействия на древесину дуба. Элементный анализ твердого продукта продемонстрировал увеличение содержания углерода на 15% с сохранением исходной формы и размеров углеродистого остатка. ИК-спектроскопия газовой фракции подтвердила наличие воды, диоксида углерода, метана и монооксида углерода. В ИК-спектре углеродистого остатка наблюдалось снижение интенсивности полос, указывающее на уменьшение концентрации полярных функциональных групп. Расчетное значение теплоты сгорания углеродистого остатка увеличилось в 2 раза по сравнению с исходным сырьем. Полученные данные свидетельствуют о перспективности микроволнового пиролиза для переработки отходов лесной промышленности, в частности дубовых опилок, в высокоуглеродистые материалы для топливной промышленности.

При масштабировании на промышленный уровень необходимо учитывать геометрию реактора и при необходимости ее оптимизацию, теплоизоляцию камеры, предварительную обработку древесины для уменьшения времени воздействия. Дальнейшие исследования и разработки, направленные на повышение эффективности микроволновой обработки древесины, позволят создать экономически выгодную и экологически устойчивую технологию пиролиза.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Moreira G.D.O., Costa G.F., Cavalcante R.M., Young A.F. Process simulation and economic evaluation of pyrolysis and hydrothermal liquefaction as alternatives for the valorization of wood waste from the pulp and paper industry // Energy Conversion and Management. 2025. Vol. 325. P. 119387. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.119387.

2. Marchenko O., Solomin S., Kozlov A., Shamanskiy V., Donskoy I. Economic efficiency assessment of using wood waste in cogeneration plants with multi-stage gasification // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, no. 21. P. 7600. DOI: 10.3390/app10217600.

3. Inari G.N., Pétrissans M., Pétrissans A., Gérardin P. Elemental composition of wood as a potential marker to evaluate heat treatment intensity // Polymer Degradation and Stability. 2009. Vol. 94, no. 3. P. 365–368. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.12.003.

4. Masfuri I., Amrullah A., Farobie O., Anggoro T., Rian S. F., Prabowo W., et al. Temperature effects on chemical reactions and product yields in the co-pyrolysis of wood sawdust and waste tires: an experimental investigation // Results in Engineering. 2024. Vol. 23. P. 102638. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102638.

5. Turek-Szytow J., Michalska J., Dudło A., Krzemiński P., Ribeiro A.L., Nowak B., et al. Soil application potential of post-sorbents produced by co-sorption of humic substances and nutrients from sludge anaerobic digestion reject water // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 370. P. 122465. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122465.

6. Jadlovec M., Honus S., Čespiva J. Pyrolysis solid product as a sorbent for flue gases mercury capture – Part II: Sorbent utilization // Environmental Technology & Innovation. 2024. Vol. 35. P. 103678. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103678.

7. Xiong J., Zhang J., Du J., He C., Zhang Z., Yang Z., et al. Native corncob-derived biosorbent with grafted 1,3,4-thiadiazole for enhanced adsorption of palladium in metallurgical wastewater // Journal of Colloid and Interface Science. 2025. Vol. 681. P. 292–304. DOI: 10.1016/j.jcis.2024.11.157.

8. Robinson J.P., Kingman S.W., Barranco R., Snape C.E., Al-Sayegh H. Microwave pyrolysis of wood pellets // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2010. Vol. 49, no. 2. P. 459–463. DOI: 10.1021/ie901336k.

[1]Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса: учеб. пособие для студентов. М.: Изд-во МГУ, 1981. 273 с.

9. Do Nascimento V.R., dos Santos M.B., Diehl L., Paniz J.N.G., de Castilhos F., Bizzi C.A. Microwave-assisted pyrolysis of pine wood waste: system development, biofuels production, and characterization // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2024. Vol. 183. P. 106799. DOI: 10.1016/j.jaap.2024.106799.

10. Undri A., Abou-Zaid M., Briens C., Berruti F., Rosi L., Bartoli M., et al. Bio-oil from pyrolysis of wood pellets using a microwave multimode oven and different microwave absorbers // Fuel. 2015. Vol. 153. P. 464–482. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.02.081.

11. Aichholzer A., Schuberth C., Mayer H., Arthaber H. Microwave testing of moist and oven-dry wood to evaluate grain angle, density, moisture content and the dielectric constant of spruce from 8 GHz to 12 GHz // European Journal of Wood and Wood Products. 2018. Vol. 76. P. 89–103. DOI: 10.1007/s00107-017-1203-x.

12. Salema A.A., Afzal M.T., Bennamoun L. Pyrolysis of corn stalk biomass briquettes in a scaled-up microwave technology // Bioresource Technology. 2017. Vol. 233. P. 353–362. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.02.113.

13. De la Hoz A., Díaz-Ortiz Á., Moreno A. Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave effects // Chemical Society Reviews. 2005. Vol. 34, no. 2. P. 164–178. DOI: 10.1039/B411438H.

14. Zhang X., Hayward D.O., Mingos D.M.P. Apparent equilibrium shifts and hot-spot formation for catalytic reactions induced by microwave dielectric heating // Chemical Communications. 1999. Vol. 11. P. 975–976. DOI: 10.1039/a901245a.

15. Ramirez A., Hueso J.L., Mallada R., Santamaria J. *In situ* temperature measurements in microwave-heated gas-solid catalytic systems. Detection of hot spots and solid-fluid temperature gradients in the ethylene epoxidation reaction // Chemical Engineering Journal. 2017. Vol. 316. P. 50–60. DOI: 10.1016/j.cej.2017.01.077.

16. Habouria M., Ouertani S., Mansour N.B., Azzouz S., Elaieb M.T. Influence of microwave power and heating time on the drying kinetics and mechanical properties of *Eucalyptus gomphocephala* wood // Frontiers in Heat and Mass Transfer. 2025. Vol. 23, no. 1. P. 345–360. DOI: 10.32604/fhmt.2024.057387.

17. Xing X., Li S., Jin J., Wang Z., Fu F. Effects of high-intensity microwave (HIMW) treatment on mechanical properties and bending failure mechanisms of radiata pine (*Pinus Radiata* D. Don) // Wood Science and Technology. 2024. Vol. 58. P. 2073–2096. DOI: 10.1007/s00226-024-01601-x.

18. Colom X., Carrillo F. Comparative study of wood samples of the northern area of catalonia by FTIR // Journal of Wood Chemistry and Technology. 2005. Vol. 25, no. 1–2. P. 1–11. DOI: 10.1081/WCT-200058231.

19. Pandey K.K. A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy // Journal of Applied Polymer Science. 1999. Vol. 71, no. 12. P. 1969–1975. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19990321)71:12<1969::AID-APP6>3.0.CO;2-D.

20. Пожидаев В.М., Ретивов В.М., Панарина Е.И., Сергеева Я.Э., Жданович О.А., Яцишина Е.Б. Разработка метода идентификации породы древесины в археологических материалах методом ИК-спектроскопии // Журнал аналитической химии. 2019. Т. 74. N 12. С. 911–921. DOI: 10.1134/s0044450219120107. EDN: GBSFCS.

REFERENCES

1. Moreira G.D.O., Costa G.F., Cavalcante R.M., Young A.F. Process simulation and economic evaluation of pyrolysis and hydrothermal liquefaction as alternatives for the valorization of wood waste from the pulp and paper industry. *Energy Conversion and Management*. 2025;325:119387. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.119387.

2. Marchenko O., Solomin S., Kozlov A., Shamanskiy V., Donskoy I. Economic efficiency assessment of using wood waste in cogeneration plants with multi-stage gasification. *Applied Sciences*. 2020;10(21):7600. DOI: 10.3390/app10217600.

3. Inari G.N., Pétrissans M., Pétrissans A., Gérardin P. Elemental composition of wood as a potential marker to evaluate heat treatment intensity. *Polymer Degradation and Stability*. 2009;94(3):365-368. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.12.003.

4. Masfuri I., Amrullah A., Farobie O., Anggoro T., Rian S. F., Prabowo W., et al. Temperature effects on chemical reactions and product yields in the co-pyrolysis of wood sawdust and waste tires: an experimental investigation. *Results in Engineering*. 2024;23:102638. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102638.

5. Turek-Szytow J., Michalska J., Dudło A., Krzemiński P., Ribeiro A.L., Nowak B., et al. Soil application potential of post-sorbents produced by co-sorption of humic substances and nutrients from sludge anaerobic digestion reject water. *Journal of Environmental Management*. 2024;370:122465. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122465.

6. Jadlovec M., Honus S., Češpiva J. Pyrolysis solid product as a sorbent for flue gases mercury capture – Part II: Sorbent utilization. *Environmental Technology & Innovation*. 2024;35:103678. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103678.

7. Xiong J., Zhang J., Du J., He C., Zhang Z., Yang Z., et al. Native corncob-derived biosorbent with grafted 1,3,4-thiadiazole for enhanced adsorption of palladium in metallurgical wastewater. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2025;681:292–304. DOI: 10.1016/j.jcis.2024.11.157.

8. Robinson J.P., Kingman S.W., Barranco R., Snape C.E., Al-Sayegh H. Microwave pyrolysis of wood pellets. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2010;49(2):459-463. DOI: 10.1021/ie901336k.

9. Do Nascimento V.R., dos Santos M.B., Diehl L., Paniz J.N.G., de Castilhos F., Bizzi C.A. Microwave-assisted pyrolysis of pine wood waste: system development, biofuels production, and characterization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2024;183:106799. DOI: 10.1016/j.jaap.2024.106799.

10. Undri A., Abou-Zaid M., Briens C., Berruti F., Rosi L., Bartoli M., et al. Bio-oil from pyrolysis of wood pellets using a microwave multimode oven and different microwave absorbers. *Fuel*. 2015;153:464-482. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.02.081.

11. Aichholzer A., Schuberth C., Mayer H., Arthaber H. Microwave testing of moist and oven-dry wood to evaluate grain angle, density, moisture content and the dielectric constant of spruce from 8 GHz to 12 GHz. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2018;76:89-103. DOI: 10.1007/s00107-017-1203-x.

12. Salema A.A., Afzal M.T., Bennamoun L. Pyrolysis of corn stalk biomass briquettes in a scaled-up microwave technology. *Bioresource Technology*. 2017;233:353-362. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.02.113.

13. De la Hoz A., Díaz-Ortiz Á., Moreno A. Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave effects. *Chemical Society Reviews*. 2005;34(2):164-178. DOI: 10.1039/B411438H.

14. Zhang X., Hayward D.O., Mingos D.M.P. Apparent equilibrium shifts and hot-spot formation for catalytic reactions induced by microwave dielectric heating. *Chemical Communications*. 1999;11:975-976. DOI: 10.1039/a901245a.

15. Ramirez A., Hueso J.L., Mallada R., Santamaria J. *In situ* temperature measurements in microwave-heated gas-solid catalytic systems. Detection of hot spots and solid-fluid temperature gradients in the ethylene epoxidation reaction. *Chemical Engineering Journal*. 2017;316:50-60. DOI: 10.1016/j.cej.2017.01.077.

16. Habouria M., Ouertani S., Mansour N.B., Azzouz S., Elaieb M.T. Influence of microwave power and heating time on the drying kinetics and mechanical properties of *Eucalyptus gomphocephala* wood. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*. 2025;23(1):345-360. DOI: 10.32604/fhmt.2024.057387.

17. Xing X., Li S., Jin J., Wang Z., Fu F. Effects of high-intensity microwave (HIMW) treatment on mechanical properties and bending failure mechanisms of radiata pine (*Pinus Radiata* D. Don). *Wood Science and Technology*. 2024;58:2073-2096. DOI: 10.1007/s00226-024-01601-x.

18. Colom X., Carrillo F. Comparative study of wood samples of the northern area of catalonia by FTIR. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 2005;25(1-2):1-11. DOI: 10.1081/WCT-200058231.

19. Pandey K.K. A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*. 1999;71(12):1969-1975. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19990321)71:12<1969::AID-APP6>3.0.CO;2-D.

20. Pozhidaev V.M., Retivov V.M., Panarina E.I., Sergeeva Y.E., Zhdanovich O.A., Yatsishina E.B. Development of a method for identifying wood species in archaeological materials by IR spectroscopy. *Zhurnal analiticheskoi khimii*. 2019;74(12):911-921. (In Russian). DOI: 10.1134/s0044450219120107. EDN: GBSFCS.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алыева Алиса Биняминовна,
к.х.н.,
научный сотрудник,
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
доцент,
Нижегородский государственный т
ехнический университет им. Р.Е. Алексеева,
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24,
Российская Федерация,
a.alyeva@ipfran.ru
https://orcid.org/0000-0003-3749-7738

Ананичева Светлана Андреевна,
младший научный сотрудник,
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
bulanova@ipfran.ru
https://orcid.org/0000-0002-4008-3328

Крапивницкая Татьяна Олеговна,
к.т.н., научный сотрудник,
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
✉ kto@ipfran.ru
https://orcid.org/0000-0002-4020-7482

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alisa B. Alyeva,
Cand. Sci. (Chemistry),
Researcher,
A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
Associate Professor,
Nizhny Novgorod State Technical University,
24, Minin St., Nizhny Novgorod, 603155,
Russian Federation,
a.alyeva@ipfran.ru
https://orcid.org/0000-0003-3749-7738

Svetlana A. Ananicheva,
Junior Researcher,
A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
bulanova@ipfran.ru
https://orcid.org/0000-0002-4008-3328

Tatiana O. Krapivnitckaia,
Cand. Sci. (Engineering), Researcher,
A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
✉ kto@ipfran.ru
https://orcid.org/0000-0002-4020-7482

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

Ананичев Андрей Алексеевич,
младший научный сотрудник,
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
a0810@ipfran.ru
https://orcid.org/0000-0002-6503-9454

Преображенский Евгений Игоревич,
младший научный сотрудник,
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
evgenypr@ipfran.ru
https://orcid.org/0000-0002-7441-6354

Широков Дмитрий Алексеевич,
ассистент,
Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева,
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24,
Российская Федерация,
dima.shirokov.99@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2012-8621

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

Песков Николай Юрьевич,
д.ф.-м.н., профессор РАН,
заведующий лабораторией,
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
peskov@ipfran.ru
https://orcid.org/0000-0003-4220-6608

Andrey N. Denisenko,
Leading Designer,
A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
androu@ipfran.ru
https://orcid.org/0009-0002-2765-252X

Andrey A. Ananichev,
Junior Researcher,
A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
a0810@ipfran.ru
https://orcid.org/0000-0002-6503-9454

Evgenii I. Preobrazhensky,
Junior Researcher,
A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
evgenypr@ipfran.ru
https://orcid.org/0000-0002-7441-6354

Dmitry A. Shirokov,
Assistant,
Nizhny Novgorod State Technical University,
24, Minin St., Nizhny Novgorod, 603155,
Russian Federation,
dima.shirokov.99@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2012-8621

Mikhail Yu. Glyavin,
Dr. Sci. (Physics & Mathematics),
Deputy Director for Research, Head of Department,
A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
glyavin@ipfran.ru
https://orcid.org/0000-0002-7896-9212

Nikolai Yu. Peskov,
Dr. Sci. (Physics & Mathematics),
Professor of Russian Academy of Sciences,
Head of Laboratory,
A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
peskov@ipfran.ru
https://orcid.org/0000-0003-4220-6608

Вклад авторов

А.Б. Алыева – проведение исследования, написание черновика рукописи.
С.А. Ананичева – проведение исследования, валидация результатов, визуализация.
Т.О. Крапивницкая – проведение исследования, редактирование рукописи.
А.Н. Денисенко – предоставление ресурсов, проведение исследования.
А.А. Ананичев – проведение исследования.
Е.И. Преображенский – курирование данных, проведение исследования.
Д.А. Широков – формальный анализ, проведение исследования.
М.Ю. Глявин – административное руководство исследовательским проектом.
Н.Ю. Песков – разработка концепции.

Contribution of the authors

Alisa B. Alyeva – investigation, writing – original draft.
Svetlana A. Ananicheva – investigation, validation, visualization.
Tatiana O. Krapivnitckaia – investigation, editing.
Andrey N. Denisenko – resources, investigation.
Andrey A. Ananichev – investigation.
Evgenii I. Preobrazhensky – data curation, investigation.
Dmitry A. Shirokov – formal analysis, investigation.
Mikhail Yu. Glyavin – project administration.
Nikolai Yu. Peskov – conceptualization.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

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.

Информация о статье

Поступила в редакцию 24.04.2025.
Одобрена после рецензирования 09.09.2025.
Принята к публикации 29.10.2025.

Information about the article

The article was submitted 24.04.2025.
Approved after reviewing 09.09.2025.
Accepted for publication 29.10.2025.