

Научная статья

УДК 662.76

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-145-154

## Термическое разложение пеллет из смеси торфа и кородревесных отходов

**А.П. Терехин**<sup>✉</sup>, науч. сотр.; ResearcherID: [JMR-0649-2023](https://orcid.org/0009-0005-1737-1881),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1737-1881>

**П.А. Марьяндышев**, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [E-7880-2016](https://orcid.org/0000-0002-3880-8289),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3880-8289>

**И.И. Голованова**, аспирант; ResearcherID: [LRC-4582-2024](https://orcid.org/0009-0009-0231-2503),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0231-2503>

**А.А. Громов**, аспирант; ResearcherID: [LQK-6780-2024](https://orcid.org/0009-0000-0575-8820),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0575-8820>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; [terehin.a@edu.narfu.ru](mailto:terehin.a@edu.narfu.ru)<sup>✉</sup>, [p.marjyandishev@narfu.ru](mailto:p.marjyandishev@narfu.ru), [imukhrewa@gmail.com](mailto:imukhrewa@gmail.com), [gromov.a@edu.narfu.ru](mailto:gromov.a@edu.narfu.ru)

Поступила в редакцию 11.11.24 / Одобрена после рецензирования 06.02.25 / Принята к печати 07.02.25

**Аннотация.** В Архангельской области находятся крупные залежи торфа. По данным балансового учета, насчитывается 626 месторождений, площадь каждого из которых превышает 10 га. При этом для Архангельской области существует проблема эффективной энергетической утилизации вторичных энергетических ресурсов, таких как древесные отходы и кора, образующихся на предприятиях лесопромышленного комплекса. На синхронном термоанализаторе в среде аргона и воздуха в диапазоне температур 30–700 °С выполнен термический анализ пеллет из смеси торфа (80 %) и кородревесных отходов целлюлозно-бумажного производства (20 %). Торф был собран в Мезенском районе Архангельской области, образцы кородревесных отходов – на тракте подачи коры в котлоагрегаты с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ и КМ75-40М, установленные на ТЭС-3 АО «Архангельский ЦБК». Пеллеты получены в пресс-грануляторе. С помощью спектрометра исследован элементный состав пеллет. Основными золо- и шлакообразующими элементами в образцах являются кремний, алюминий, кальций и железо. Термический анализ пеллет проведен на синхронном термоанализаторе в среде аргона и воздуха с расходом 20 см<sup>3</sup>/мин. Для наблюдений за сушкой и термическими преобразованиями пеллет использовались кривые убыли массы и скорости этого процесса в исследуемых образцах топливных гранул. Показано, что выход летучих веществ происходил при температурах от 170 до 430 °С. Полученные пеллеты являются высококалорийным и низкосольным биотопливом. Результаты исследования можно применять для теоретического обоснования производства топлива с высокими теплотой сгорания и механической прочностью с целью увеличения роли местной биомассы в энергетике Архангельской области.

**Ключевые слова:** торфяное топливо, кородревесные отходы, пеллеты, гранулятор, термический анализ, термограммы, рентгенофлуоресцентный анализ, лигнин, целлюлоза, гемицеллюлоза

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет средств Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024-0007.

*Для цитирования:* Терехин А.П., Марьяндышев П.А., Голованова И.И., Громов А.А. Термическое разложение пеллет из смеси торфа и кородревесных отходов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 145–154. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-145-154>

Original article

## Thermal Decomposition of Pellets from a Mixture of Peat and Bark Waste

*Aleksey P. Terekhin*<sup>✉</sup>, Research Scientist; ResearcherID: [JMR-0649-2023](https://orcid.org/0009-0005-1737-1881),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1737-1881>

*Pavel A. Maryandyshv*, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [E-7880-2016](https://orcid.org/0000-0002-3880-8289),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3880-8289>

*Irina I. Golovanova*, Postgraduate Student; ResearcherID: [LRC-4582-2024](https://orcid.org/0009-0009-0231-2503),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0231-2503>

*Anton A. Gromov*, Postgraduate Student; ResearcherID: [LQK-6780-2024](https://orcid.org/0009-0000-0575-8820),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0575-8820>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; [terehin.a@edu.narf.ru](mailto:terehin.a@edu.narf.ru)<sup>✉</sup>, [p.marjandyshv@narfu.ru](mailto:p.marjandyshv@narfu.ru), [imukhrewa@gmail.com](mailto:imukhrewa@gmail.com), [gromov.a@edu.narf.ru](mailto:gromov.a@edu.narf.ru)

---

Received on November 11, 2024 / Approved after reviewing on February 6, 2025 / Accepted on February 7, 2025

---

**Abstract.** There are large peat deposits in the Arkhangelsk Region. According to the balance sheet data, there are 626 deposits, each of which has an area exceeding 10 ha. At the same time, the Arkhangelsk Region faces the problem of efficient energy utilization of secondary energy resources, such as wood waste and bark, generated at timber industry enterprises. Thermal analysis of pellets from a mixture of peat (80 %) and bark waste from pulp and paper production (20 %) has been performed on a synchronous thermal analyzer in an argon and air environment in the temperature range of 30–700 °C. Peat has been collected in the Mezensky District of the Arkhangelsk Region, and samples of bark waste have been collected from the bark feed line to the E-75-3.9-440 DFT and KM75-40M fluidized bed boiler units installed at TPP-3 of Arkhangelsk Pulp and Paper Mill. The pellets have been obtained in a pellet-press. The elemental composition of pellets has been studied using a spectrometer. The main ash- and slag-forming elements in the samples are silicon, aluminum, calcium and iron. The thermal analysis of pellets has been carried out on a synchronous thermal analyzer in an argon and air medium with a flow rate of 20 cm<sup>3</sup>/min. To observe the drying and thermal transformations of pellets, the curves of the decrease in mass and speed of this process in the studied samples of fuel pellets have been used. It has been shown that the release of volatile substances has occurred at temperatures from 170 to 430 °C. The resulting pellets are high-calorie and low-ash biofuel. The results of the research can be applied for theoretical substantiation of the production of fuels with high combustion heat and mechanical strength in order to increase the role of local biomass in the energy sector of the Arkhangelsk Region.

**Keywords:** peat fuel, bark waste, pellets, granulator, thermal analysis, thermograms, X-ray fluorescence analysis, lignin, cellulose, hemicellulose

**Acknowledgements:** The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. FSRU-2024-0007.

**For citation:** Terekhin A.P., Maryandyshev P.A., Golovanova I.I., Gromov A.A. Thermal Decomposition of Pellets from a Mixture of Peat and Bark Waste. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 145–154. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-145-154>

### *Введение*

Среди ключевых задач энергетической стратегии России на период до 2035 г. можно отметить переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, рациональному природопользованию, достижение энергетической эффективности и безопасности, диверсификацию используемых видов топлива и энергии. Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) играет ведущую роль в экономическом развитии и обеспечении национальной безопасности Российской Федерации. Кроме того, согласно энергетической стратегии страны на период до 2035 г., ТЭК существенно влияет на состояние окружающей среды. Доктрина энергетической безопасности России, утвержденная указом Президента Российской Федерации от 13 мая 2019 г., ставит задачу улучшения инфраструктуры и объектов ТЭК Арктической зоны Российской Федерации и увеличения доли в энергетике местных энергетических ресурсов и возобновляемых источников энергии. Стратегия экологической безопасности РФ также утверждает о важности эффективного применения природных ресурсов и повышении уровня утилизации отходов производства и потребления, при этом отмечая как одну из главных проблем сокращение запасов природных ископаемых ресурсов, таких как газ, уголь и нефть.

В число наиболее перспективных способов решения обозначенных проблем входит увеличение доли возобновляемого биотоплива в общем энергобалансе. Стратегия сокращения доли традиционных видов ископаемых топлив и повышения доли возобновляемых источников топлива уже интегрирована и адаптирована в планы по борьбе с изменением климата и обеспечению энергетической безопасности во всем мире [1–3, 5, 6, 9, 10].

Биоэнергетика может стать основным вектором развития децентрализованной и возобновляемой энергетики в России, поскольку на территории страны сосредоточено примерно 25 % мировых запасов древесины и около 45 % мировых запасов торфа [4].

Торф – горючее ископаемое, возникающее из растительных остатков. Ежегодно в России образуется 260–280 млн т торфа, но применяется только 1,1–1,2 %. Ресурсы торфа в нашей стране превышают запасы нефти и газа, уступая только каменному углю. Отходы биомассы, такие как древесные остатки и сельскохозяйственные отходы могут быть эффективно использованы совместно с торфом для создания новых энергетических биотехнологий [4].

Для Арктической зоны Российской Федерации существует проблема эффективного расходования вторичных энергоресурсов, поэтому следует искать методы переработки древесных отходов и коры, образующихся в процессе производства.

Технология гранулирования становится все более востребованной в сфере применения биомассы в качестве источника энергии. С помощью гранулирования биомассы достигается увеличение ее энергетической эффективности. Важнейшим преимуществом топливных гранул является высокая и постоянная насыпная плотность, обуславливающая относительную легкость транспортировки этого сыпучего продукта на большие расстояния. Благодаря правильной

форме, небольшому размеру и однородной консистенции продукта гранулы можно пересыпать через специальные рукава, что позволяет автоматизировать погрузку и разгрузку данного вида топлива, его сжигание. Химические характеристики готовых гранул зависят от исходного сырья.

Технология создания пеллет включает множество параметров [8, 16]. Авторы [7] изучали физико-механические характеристики топливных пеллет из древесины лиственных пород и пришли к выводу, что обработка измельченного древесного сырья (лиственных пород древесины) насыщенным паром позволяет получать пеллеты требуемого качества, при этом их механическая прочность сравнима с достигаемой при использовании древесины хвойных пород. Н.А. Сычева и соавторы [12] исследовали влияние режима гранулирования (температуры и давления) на прочностные свойства топливных пеллет из древесины сосны, ольхи черной, ольхи серой и березы и заключили, что увеличение температуры и давления прессования повышает прочность пеллет более чем в 3 раза.

Цель исследования – комплексный термический анализ пеллет из смеси торфа и кородревесных отходов с достоверной оценкой термогравиметрических данных и кинетических характеристик процессов, ответственных за термохимическое превращение пеллет, изучение их элементного состава.

#### *Объекты и методы исследования*

Торфяная масса была собрана в Мезенском районе Архангельской области, получаемый здесь в промышленных масштабах торф используется как топливо для местной котельной. Образцы кородревесных отходов лиственных пород получены на тракте подачи коры в котлоагрегаты с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ и КМ75-40М на ТЭС-3 АО «Архангельский ЦБК». Отбор, формирование и подготовка проб торфа и кородревесных отходов выполнялись в соответствии с ГОСТ 33563–2015, ГОСТ Р 54187–2010, ГОСТ 33255–2015, ГОСТ 33104–2014.

Гранулирование смеси 2 биотоплив проводилось в пресс-грануляторе Amandus Kahl (рис. 1). С целью увеличения механической прочности пеллет осуществлялось добавление кородревесных отходов к торфяной массе. Для снижения зольности получаемых пеллет выбрана доля древесных отходов 20 %.

При выполнении экспериментов топливная смесь из торфа и кородревесных отходов подавалась в приемный бункер с перемешивающим устройством и далее шнеком направлялась в прессовальную камеру, где распределялась на матрице. Вращающиеся валки предварительно сжимали смесь и проталкивали через прессовальные каналы матрицы.

Для выполнения теплотехнических исследований и элементного анализа образцы были подвергнуты размолу в шаровой барабанной мельнице РМ 200 Retzsch, просеяны на ситовом анализаторе Retzsch AS 200 Control до гранулометрического состава от 63 до 125 мкм (ГОСТ Р 53335–2018, 55660–2013, 52917–2008, 55661–2013).

Теплотехнические характеристики кородревесных отходов следующие: зольность – 1,16 % а. с. м.; минимальная теплота сгорания – 18,486 МДж/кг, выход летучих веществ – 81,86 % а. с. м. Торфа: зольность – 2,46 % а. с. м.; минимальная теплота сгорания – 21,780 МДж/кг и выход летучих веществ – 78,43 % а. с. м. Характеристики полученных пеллет представлены в таблице.

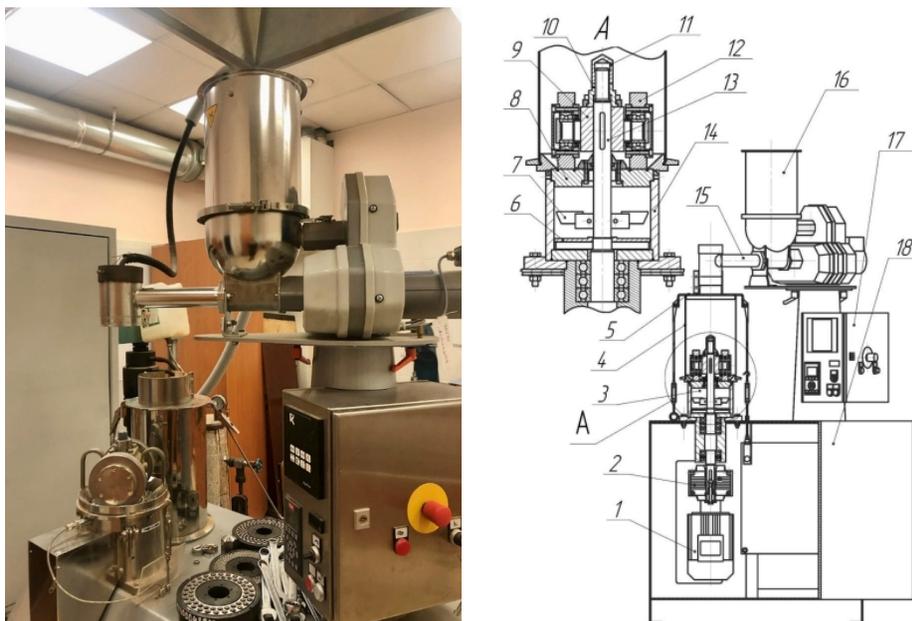


Рис. 1. Пресс-гранулятор Amandus Kahl 14-175

1 – асинхронный двигатель мощностью 3 кВт; 2 – редуктор с понижающей передачей; 3 – прессовальная камера; 4 – кожух; 5 – противопылевой колпак с рассекателем; 6 – вращающееся дно; 7 – ножи; 8 – каналы матрицы; 9 – бегунковая головка; 10 – регулировочная гайка; 11 – контргайка; 12 – бегунки; 13 – главный вал; 14 – корпус; 15 – дозирующее устройство; 16 – приемный бункер с перемешивающим устройством и шнеком; 17 – распределительный шкаф; 18 – корпус гранулятора

Fig. 1. The Amandus Kahl 14-175 pellet-press

1 – 3 kW asynchronous motor; 2 – reduction gearbox; 3 – bale chamber; 4 – casing; 5 – dust cover with a divider; 6 – rotating bottom; 7 – knives; 8 – matrix channels; 9 – slider head; 10 – adjusting nut; 11 – lock-nut; 12 – sliders; 13 – main shaft; 14 – housing; 15 – dispenser; 16 – receiving hopper with a mixing device and a screw; 17 – distribution cabinet; 18 – pelletizer housing

### Характеристики пеллет из торфа и кордревесных отходов

#### The characteristics of peat and bark waste pellets

Параметр	ГОСТ 33103.2–2017	Значение
Диаметр/длина (мм)	10	10 / 25
Влажность на рабочую массу (%)	0,50	4,79
Зольность (% а. с. м.)	2,00	1,79
Механическая прочность (%)	95,0	96,2
Содержание мелочи (%)	3,0	2,2
Насыпная плотность (кг/м <sup>3</sup> )	650	660
Минимальная теплота сгорания на рабочую массу (МДж/кг)	–	19,81
Содержание азота (% а. с. м.)	2,00	1,59
Содержание серы (% а. с. м.)	0,200	0,179
Содержание хлора (% а. с. м.)	0,01	0
Выход летучих веществ (%)	–	78,42

Элементный анализ был проведен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре EDX-8000. Содержание водорода, азота и углерода определено с помощью анализатора EuroVector EA-3000.

Термический анализ выполнен на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter Netzsch в диапазоне температур 30–700 °С со скоростью 10 °С/мин в среде аргона и воздуха с расходом 20 см<sup>3</sup>/мин. Для исследования процессов сушки и термического разложения использовались кривые, характеризующие изменение массы (ТГ – термогравиметрия) и скорости этого процесса (ДТГ – дифференциальная термогравиметрия).

### *Результаты исследования и их обсуждение*

На грануляторе был подобран режим, при котором получились пеллеты (рис. 2), соответствующие стандарту ГОСТ 33103.2–2017 – цилиндрической формы, длиной 25 мм, с обломленными концами.



Рис. 2. Полученные гранулы из торфа и кордревесных отходов

Fig. 2. The resulting pellets from peat and bark waste

Элементный состав (%) пеллет следующий:

Кремний.....	1,440
Алюминий.....	0,540
Железо.....	0,155
Кальций.....	0,440
Магний.....	0,320
Сера.....	0,179
Калий.....	0,069
Фосфор.....	0,092
Титан.....	0,018
Марганец.....	0,011
Медь.....	0,004
Мышьяк.....	0,006
Хром.....	0,002
Стронций.....	0,002
Бром.....	0,005
Цинк.....	0,009
Рубидий.....	0,001
Кислород.....	38,200
Углерод.....	49,900
Азот.....	1,590
Водород.....	6,980

Кремний, алюминий, кальций и железо являются преобладающими элементами в золе пеллет. Повышенное содержание в пеллетах алюминия и взаимодействие материала с кремнием в процессе горения биотоплива повышают шлаковую и эрозионную способности образующихся очаговых остатков и их налипание на поверхности нагрева. Содержание щелочных элементов (калий, натрий) в полученных гранулах низкое – 0,07 %. Это означает, что при их сжигании снизится вероятность налипания легкоплавких соединений калия на поверхности нагрева, в топках с кипящим слоем топливо с небольшим содержанием калия позволит избежать явлений агломерации кипящего слоя. Наличие в составе пеллет соединений серы говорит о необходимости исключения низкотемпературной коррозии хвостовых поверхностей нагрева при сжигании этих пеллет в промышленных энергоустановках [11, 19].

На рис. 3–4 показаны термограммы в виде кривых ТГ и ДТГ для различных пеллет из торфа и кородревесных отходов в средах воздуха и аргона.

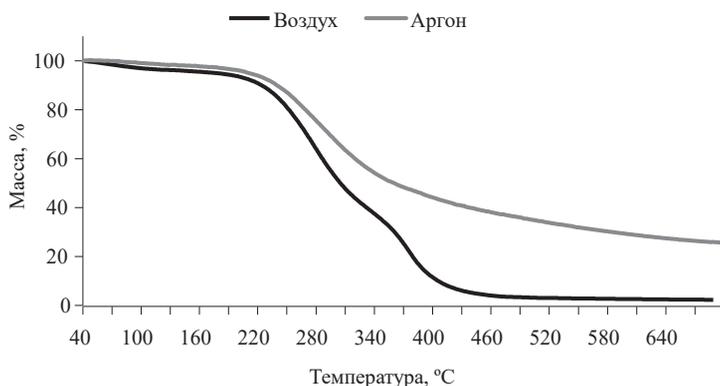


Рис. 3. Термограммы изменения массы пеллет из торфа и кородревесных отходов при скорости нагрева 20 °C/мин в диапазоне температур 40–700 °C в средах воздуха и аргона

Fig. 3. The thermograms of changes in the mass of pellets from peat and bark waste at a heating rate of 20 °C/min in the temperature range of 40–700 °C in air and argon mediums

Как показано на рис. 3, 1-я стадия потери массы протекает в диапазоне низких температур от 40 до 170 °C и приводит к незначительному уменьшению массы (на 4,9 % в воздухе и на 2,2 % в аргоне) в обоих опытах. Это связано с испарением воды и выделением легких летучих веществ из образцов. В интервале температур от 170 до 430 °C у образцов уходит наибольшая часть массы, что соответствует разложению гемицеллюлозы [13, 15, 18].

Стадия пиролиза характеризуется невысокой и очень медленной потерей массы, что связано с разложением целлюлозы. В случае с биотопливом масса на стадии пиролиза уменьшается из-за окислительной дегградации, т. е. летучие вещества выделяются и сгорают [13].

Скорость потери массы в воздухе достигла максимума при температуре 281 °C, при этом также наблюдался пик скорости изменения массы при 378 °C. Скорость уменьшения массы в аргоне становилась максимальной при 283 °C, при этом не наблюдался 2-й пик скорости изменения массы, как в 1-м опыте. При такой температуре целлюлоза разлагалась, в то время как лигнин продолжал разрушаться [17].

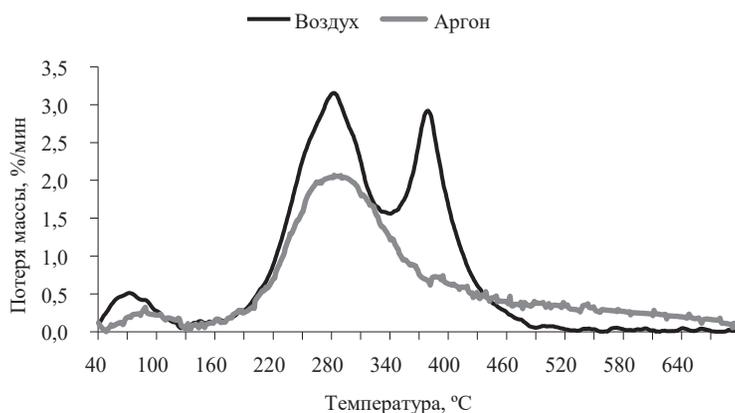


Рис. 4. Термограммы скорости потери массы пеллет из торфа и кородревесных отходов при скорости нагрева 20 °С/мин в диапазоне температур 40–700 °С в средах воздуха и аргона

Fig. 4. The thermograms of the mass loss rate of pellets from peat and bark waste at a heating rate of 20 °C/min in the temperature range of 40–700 °C in air and argon mediums

Разложение лигнина продолжалось с низкой скоростью при температуре выше 420 °С. Лигнин, как правило, является наиболее трудноразрушаемым компонентом по сравнению с целлюлозой и гемицеллюлозой. Хотя разложение этой составляющей может начаться уже при 160 °С, оно происходит медленно, а температура при этом достигает 900 °С. Причина потери массы при температуре от 420 °С – сгорание коксового остатка [14, 20].

#### Заключение

Получены топливные пеллеты из смеси торфа (80 %) и кородревесных отходов (20 %) с теплотой сгорания 19,81 МДж/кг, выходом летучих веществ 78,42 % и зольностью 1,79 %. Добавление кородревесных отходов к торфу позволило снизить зольность пеллет и увеличить их механическую прочность.

Термические исследования пеллет показали, что выход летучих веществ совпадает с диапазоном температур от 170 до 430 °С, что соответствует стадии разложения гемицеллюлозы. Процесс пиролиза пеллет в воздушной среде характеризуется 2 пиками при температурах 281 и 378 °С. Сгорание коксового остатка осуществляется при температуре от 420 °С.

Основными золо- и шлакообразующими элементами полученных пеллет являются кремний, алюминий, кальций и железо. Содержание серы, мышьяка и цинка в пеллетах составило 0,179, 0,006, и 0,009 % соответственно. Не обнаружены кадмий, ртуть, свинец и никель.

Преимуществами созданного топлива перед традиционными гранулами из древесных отходов являются более высокая теплота сгорания и меньшее содержание щелочных элементов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беликова С.С., Беликов А.В. Восток и Запад: глобальные вызовы на пути достижения углеродной нейтральности // Управление. 2022. Т. 10, № 2. С. 5–13.

Belikova S.S., Belikov A.V. East and West: Global Challenges to Achieving Carbon Neutrality. *Upravlenie = Management (Russia)*, 2022, vol. 10, no. 2, pp. 5–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.26425/2309-3633-2022-10-2-5-13>

2. Бобылев С.Н., Барабошкина А.В., Джу Сюан. Приоритеты низкоуглеродного развития для Китая // Государственное управление. Электрон. вестн. 2020. № 82. С. 114–139.

Bobylev S.N., Baraboshkina A.V., Zhu Xuan. Priorities of Low-Carbon Development for China. *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyj vestnik = Public Administration. E-journal*, 2020, no. 82, pp. 114–139. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/20701381-2020-10095>

3. Бояркина А.В. Экологическое направление во внешнеполитической стратегии КНР // Вестн. РУДН. Сер.: Международные отношения. 2021. Т. 21, № 2. С. 325–337.

Boyarkina A.V. Ecological Dimension in China's Foreign Policy Strategy. *Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Mezhdunarodnye otnosheniya = Vestnik RUDN. International Relations*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 325–337. (In Russ.). <https://doi.org/10.22363/2313-0660-2021-21-2-325-337>

4. Бушув В., Зайченко В., Чернявский А., Шевченко А. Энергетический переход: перспективы использования биомассы // Энергетическая политика. 2024. № 2(193). С. 68–83.

Bushuev V., Zaichenko V., Chernyavsky A., Shevchenko A. Energy Transition: Development Prospects. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, 2024, no. 2(193), pp. 68–83. (In Russ.). <https://doi.org/10.46920/2409-5516-2024-2193-68>

5. Веселова Д.Н. Климатическая политика Российской Федерации: законодательные и институциональные аспекты // ДискурсПи. 2021. Т. 18, № 3. С. 96–111.

Veselova D.N. Climate Policy of the Russian Federation: Legislative and Institutional Aspects. *DiskursPi = Discourse P*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 96–111. (In Russ.). [https://doi.org/10.17506/18179568\\_2021\\_18\\_3\\_96](https://doi.org/10.17506/18179568_2021_18_3_96)

6. Галимзянова А.К. Климатическая дипломатия Китая и Германии // Восточный альманах: сб. науч. ст. Вып. V. М.: Квант Медиа, 2021. С. 14–29.

Galimzyanova A.K. Climate Diplomacy of China and Germany. *Vostochnyj al'manakh: Collection of Scientific Articles*, iss. V. Moscow, Kvant Media Ltd., 2021, pp. 14–29. (In Russ.).

7. Дубоделова Е.В., Сычева Н.А., Хмызов И.А., Снопкова Т.А., Соловьева Т.В. Особенности технологии топливных пеллет из древесины лиственных пород // Тр. БГТУ. Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2012. № 4. С. 166–168.

Dubodelova E.V., Sycheva N.A., Khmyzov I.A., Snopkova T.A., Solov'eva T.V. Features of the Technology of Fuel Pellets from Hardwood. *Trudy BGTU. Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya = Proceedings of BSTU. Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology*, 2012, no. 4, pp. 166–168. (In Russ.).

8. Зотова Е.В., Сафонов А.О., Платонов А.Д. Аналитическое исследование параметров, определяющих технологию производства древесных пеллет // Лесотехн. журн. 2014. № 1(13). С. 127–132.

Zotova E.V., Safonov A.O., Platonov A.D. Analytical Study of the Parameters Determining the Technology of Wood Pellet Production. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2014, no. 1(13), pp. 127–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/3355>

9. Кавешников Н.Ю. Стратегия ЕС в области климата и энергетики // Современная Европа. 2015. № 1(61). С. 93–103.

Kaveshnikov N.Y. European Union's Climate and Energy Strategy. *Sovremennaya Evropa = Contemporary Europe*, 2015, no. 1(61), pp. 93–103. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.15211/soveurope1201593103>

10. Ковалев Ю.Ю., Поршинева О.С. Страны БРИКС в международной климатической политике // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. 2021. Т. 21, № 1. С. 64–78.

Kovalev Yu.Yu., Porshneva O.S. BRICS Countries in International Climate Policy. *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Seriya: Mezhdunarodnye otnosheniya* = Vestnik RUDN. International Relations, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 64–78. (In Russ.).

<https://doi.org/10.22363/2313-0660-2021-21-1-64-78>

11. Рябов Г.А., Литун Д.С. Агломерация при сжигании и газификации топлив в кипящем слое // Теплоэнергетика. 2019. № 9. С. 42–59.

Ryabov G.A., Litun D.S. Agglomeration during Combustion and Gasification of Fuels in a Fluidized Bed. *Теплоэнергетика*, 2019, no. 9, pp. 42–59. (In Russ.).

<https://doi.org/10.1134/S0040363621010173>

12. Сычева Н.А., Хмызов И.А., Соловьева Т.В. Влияние режима гранулирования и состава топливных пеллет на их прочностные свойства // Лесн. вестн. / Forestry bulletin. 2016. № 20(3). С. 72–79.

Sychova N.A., Hmyzov I.A., Soloueva T.V. The Influence of Granulation and Pellets Composition on Their Strength Properties. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 72–79. (In Russ.).

13. Aniza R., Chen W.-H., Kwon E.E., Bach Q.-V., Hoang A.T. Lignocellulosic Biofuel Properties and Reactivity Analyzed by Thermogravimetric Analysis (TGA) toward Zero Carbon Scheme: A Critical Review. *Energy Conversion and Management: X*, 2024, vol. 22, art. no. 100538. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100538>

14. Balogun A.O., Adeleke A.A., Ikubanni P.P., Adegoke S.O., Alayat A.M., McDonald A.G. Physico-Chemical Characterization, Thermal Decomposition and Kinetic Modeling of *Digitaria sanguinalis* under Nitrogen and Air Environments. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, vol. 26, art. no. 101138. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101138>

15. Escalante J., Chen W.-H., Tabatabaei M., Hoang A.T., Kwon E.E., Andrew Lin K.-Y., Saravanakumar A. Pyrolysis of Lignocellulosic, Algal, Plastic, and Other Biomass Wastes for Biofuel Production and Circular Bioeconomy: A Review of Thermogravimetric Analysis (TGA) Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 169, art. no. 112914. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112914>

16. Gilvari H., de Jong W., Schott D.L. Quality Parameters Relevant for Densification of Bio-Materials: Measuring Methods and Affecting Factors – A Review. *Biomass and Bioenergy*, 2019, vol. 120, pp. 117–134. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.013>

17. Kamba P.L.W., Vitoussia T., Bissoué A.N., Nguimbous E.N., Dieudjio D.N., Bot B.V., Njeugna E. Physical and Energetic Characteristics of Pellets Produced from Movingu Sawdust, Corn Spathes, and Coconut Shells. *Energy Reports*, 2024, vol. 11, pp. 1291–1301. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.01.006>

18. Pradhan P., Mohan O., Kurian V., Kumar A. Production and Quality Analysis of Biofuel Pellets from Canadian Forest and Agricultural Biomass. *Biomass and Bioenergy*, 2025, vol. 194, art. no. 107697. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107697>

19. Uzoagba C.E.J., Okoroigwe E., Kadivar M., Anye V.C., Bello A., Ezealigo U., Ngasoh F.O., Pereira H., Onwualu P.A. Characterization of Wood, Leaves, Barks, and Pod Wastes from *Prosopis africana* Biomass for Biofuel Production. *Waste Management Bulletin*, 2024, vol. 2, iss. 3, pp. 172–182. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.07.007>

20. Yaqoob A.A., Sekeri S.H., Othman M.B.H., Ibrahim M.N.M., Feizi Z.H. Thermal Degradation and Kinetics Stability Studies of Oil Palm (*Elaeis Guineensis*) Biomass-Derived Lignin Nanoparticle and its Application as an Emulsifying Agent. *Arabian Journal of Chemistry*, 2021, vol. 14, iss. 6, art. no. 103182. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103182>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

**Authors' Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article