



АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЫРЬЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМБИНИРОВАННОГО БРИКЕТА

Рыжиков В.А., Ерохина О.А., Аким Э.Л., Луканин П.В.

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. Высшая школа технологии и энергетики, г. Санкт-Петербург, Россия
ryzhikov_vladimir@bk.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Представлены результаты исследования по определению влияния параметров сырья – влажности и температуры в процессе прессования на физико-механические свойства полученного комбинированного брикета, состоящего из твердых древесных отходов и отходов ламинированной бумаги (лам.бумага). Приводится анализ топок различной конструкции при сжигании полученных брикетов, содержащих синтетические полимеры. Результаты исследований позволят использовать полученный композиционный материал с максимальной энергетической эффективностью при сжигании его в промышленных энергоустановках. *ЦЕЛЬЮ* исследования является определение влияния различных значений влажности и температуры в процессе прессования сырья, на конечные физико-механические параметры комбинированного брикета, такие как плотность и прочность. Проведен анализ величины сжатия брикета при различных композициях сырья и анализ различных топочных конструкций при сжигании полученного топливного брикета. *МЕТОДЫ.* В работе были использованы методы: анализ термопластичности и влагопластичности полимерных компонентов используемого сырья в процессе формирования брикета с различными композициями сырья; нормативный метод расчета котлоагрегатов с различными конструкциями топочных устройств для определения основных параметров котла при сжигании комбинированного брикета; построение зависимости величины сжатия брикета в процессе прессования от влажности и температуры при различных композициях сырья. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В работе представлены результаты: физико-механических параметров брикета при заданных параметрах влажности и температуры; основных значений теплового расчета котлоагрегата с различными конструкциями топок; величина сжатия сырья в пресс-форме в зависимости от параметров влажности и температуры, а также, от композиции сырья. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Полученные результаты позволят использовать комбинированные брикеты из древесных отходов и отходов ламинированной бумаги, с максимальной энергетической, экономической и экологической эффективностью при их сжигании в котельных установках. Полученные комбинированные брикеты имеют высокие физико-механические параметры при определенных условиях и композициях сырья, что облегчает процесс транспортировки и хранения топлива.

Ключевые слова: котельные установки; синтетические полимеры; топливные брикеты; твердое биотопливо; отходы промышленных предприятий; релаксационные состояния; теплотехнические параметры; экология.

Для цитирования: Рыжиков В.А., Ерохина О.А., Аким Э.Л., Луканин П.В. Анализ влияния теплотехнических характеристик сырья на физико-механические свойства комбинированного брикета // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 197-210. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-197-210.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF HEAT ENGINEERING CHARACTERISTICS OF RAW MATERIALS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COMBINED BRIQUETTE

Ryzhikov V.A., Erokhina O.A., Akim E.L., Lukanin P.V.

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russia
ryzhikov_vladimir@bk.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The paper presents the results of research to determine the influence of such raw material parameters as humidity and temperature in the pressing process on the physical and mechanical properties of the obtained briquette, as well as the analysis of furnaces of different designs during combustion of the obtained composite briquette consisting of solid wood waste and laminated paper waste containing synthetic polymers. The results of these studies will allow to use the obtained composite material with maximum energy efficiency when burning it in industrial power plants. *THE GOAL* of the research is to determine the effect of different values of humidity and temperature, in the process of pressing raw materials, on the final physical and mechanical parameters of the combined briquette, such as density and strength. Analyzing different furnace designs when burning the resulting fuel briquette, as well as analyzing the magnitude of compression of the briquette at different compositions of raw materials. *METHODS.* In this paper were used methods: analysis of thermoplasticity and moisture plasticity of polymer components of the raw materials used in the process of briquette formation with different compositions of raw materials; normative method of calculation of boiler units with different designs of furnace devices to determine the basic parameters of the boiler at combustion of combined briquette; construction of the dependence of the briquette compression value in the process of pressing on humidity and temperature with different compositions of raw materials. *RESULTS.* The paper presents the results of: physical and mechanical parameters of the briquette at given parameters of humidity and temperature; basic values of thermal calculation of the boiler unit with different designs of furnaces; the amount of compression of raw materials in the mold depending on the parameters of humidity and temperature, as well as, from the composition of raw materials. *CONCLUSION.* The obtained research results will allow to use combined briquettes from wood waste and laminated paper waste, with maximum energy, economic and environmental efficiency in their combustion in boiler plants. The obtained combined briquettes have high physical and mechanical parameters under certain conditions and compositions of raw materials, which facilitates the process of transportation and storage of fuel.

Keywords: boiler plants; synthetic polymers; fuel briquettes; solid biofuels; industrial wastes; relaxation states; heat engineering parameters; ecology.

For citation: Ryzhikov V.A., Erokhina O.A., Akim E.L., Lukanin P.V. Analysis of the influence of heat engineering characteristics of raw materials on physical and mechanical properties of combined briquette. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 197-210. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-197-210.

Введение (Introduction)

Актуальность материалов, изложенных в данной статье, рассматривалась в работе «Исследование физико-химических характеристик альтернативного топлива, содержащего синтетические полимеры» [1].

По данным Минпромторга (Министерство промышленности и торговли Российской Федерации), в Российской Федерации каждый год образуется от 3,6 до 5 млн. тонн пластиковых отходов, а переработке подвергаются лишь 7-10% отходов при различии степени переработки по различным видам пластика, а мировое производство пластиковых материалов превышает 400 млн. тонн в год [2]. Согласно ежегодному докладу о пластике «Earth Action» прогнозируется, что в 2024 году 31,5% производимого и используемого пластика в мире, скорее всего, попадут в воздух, воду или почву Земли [3-5]. Это означает, что 69,5 млн. тонн дополнительных пластиковых отходов окажутся в природе [3]. К 2040 году производство пластика в мире удвоится, а загрязнение пластиком утроится. Пластиковое загрязнение – это экологический кризис, суть которого в дисбалансе между объемами пластика, который производится и используется, и способностью мира управлять этими объемами, когда они становятся отходами. Дисбаланс приводит к тому, что значительное количество пластика ежегодно попадает в окружающую среду, причем большая часть попадает в океаны. Неправильное обращение с пластиковыми отходами представляет собой серьезную угрозу глобальным экосистемам и, как следствие, благополучию человека [3-4].

В России в 2024 году порядка 3,2 миллиона тонн пластиковых отходов попадет в категорию «mismanaged». Это значит, что они не просто не будут переработаны, но даже не будут размещены на полигонах твердых бытовых отходов (ТБО) – то есть осядут в водоемах или незаконных стихийных свалках [3].

Эти данные свидетельствуют о необходимости срочных мер по сокращению производства и потребления пластика, а также по совершенствованию систем его переработки. Большую часть отходов синтетических полимеров занимает упаковка и упаковочная пленка. Структура пластиковых отходов представлена на рисунке 1 [1].



Рис. 1. Структура пластиковых отходов в составе ТБО

Fig. 1. Structure of plastic waste in the composition of MSW

*Источник: Пластик и пластиковые отходы в России: ситуация, проблемы и рекомендации. Международная Сеть по Ликвидации Загрязнителей Source: International Pollutants Elimination Network

Исходя из этого, на сегодняшний день борьба с пластиковым загрязнением является одной из основных задач для улучшения экологической обстановки и обеспечения безопасности населения в РФ.

В данной работе представлены результаты, необходимые для использования полученных топливных брикетов, содержащих синтетические полимеры и древесные отходы, с максимальной энергетической, экономической и экологической эффективностью. Такие параметры, как влажность и температура, оказывают значительное влияние на физико-механические свойства готового брикета, так как в процессе формирования брикета реализуются свойства термовлагопластичности полимерных компонентов сырья. Комбинированный инновационный брикет представляется в различных композициях сырья и при различных переменных теплотехнических характеристиках [6-8]. Обосновываются достоинства и недостатки каждой композиции сырья для изготовления брикетов, содержащих синтетические полимеры.

Научная значимость заключается в получении новых результатов влияния влажности и температуры сырья на этапе формирования топливного брикета на прочность и плотность получаемого брикета. Влияние влажности и температуры сырья на этапе формирования брикета напрямую сказывается на плотности и прочности получаемого брикета. Использование сырья в различных композициях имеет свои достоинства и недостатки, зависящие от взаимодействия древесных полимерных компонентов и синтетических полимеров, в частности, от их перехода из одного релаксационного состояния в другое [9]. Выявлено, что при определенной температуре синтетические полимеры переходят из стеклообразного состояния в высокоэластическое, и, в комбинации с древесными отходами, придают дополнительный связующий эффект, когда остывают и достигают температуры стеклования, что, несомненно, повышает прочность и плотность готового брикета, а также, увеличивает способность сырья к деформации в процессе формирования брикета. Проведенный анализ топочных устройств различной конструкции позволяет подобрать оптимальную энергоустановку по основным показателям теплового расчета, с определенной конструкцией топки, что показывает возможность реализации данного топлива как в промышленности, так и в бытовых целях.

Практическая значимость исследований основывается на том, что результаты работы, изложенные в данной статье, показывают возможность частичного решения проблемы пластикового загрязнения в РФ [10-11]. Использование полученного инновационного топлива, прежде всего, повысит экологическую безопасность страны и позволит уменьшить количество не утилизируемых пластиковых отходов.

Материалы и методы (Materials and methods)

В работе были использованы методы: анализ термопластичности и влагопластичности полимерных компонентов используемого сырья в процессе

формирования брикета с различными композициями сырья [9]; нормативный метод расчета котлоагрегатов с различными конструкциями топочных устройств для определения основных параметров котла при сжигании комбинированного брикета; построение зависимости величины сжатия брикета в процессе прессования от влажности и температуры с различными композициями сырья.

Основными материалами в ходе работы были: твердые древесные отходы лиственницы [12-13] и отходы производства ламинированной бумаги, с содержанием синтетического полимера, в качестве которого был использован полиэтилен марки 11503-070 низкой плотности (высокого давления) [14-15] в соотношении с бумагой 50/50%.

Ход исследования состоял из следующих этапов:

- Были использованы несколько вариантов композиций из измельченных древесных отходов и измельченной ламинированной бумаги [1], массой 2 грамма: (100/0% (древесина/лам.бумага), 70/30% (древесина/лам.бумага) 50/50% (древесина/лам.бумага), 30/70% (древесина/лам.бумага), 0/100% (древесина/лам.бумага)) [1];
- Увлажнение сырья, во всех исследуемых композициях, насыщенным паром в разных временных промежутках;
- Определение зависимости приобретенной влажности сырья от времени увлажнения насыщенным паром при различных композициях исходного материала;
- Проведение анализа зависимости плотности и прочности брикета при различных значениях влажности сырья и при комнатной температуре (20°C) для трех исследуемых композиций исходного материала;
- Проведение анализа зависимости плотности и прочности брикета при различных значениях температуры в процессе прессования и при одинаковом времени пропарки сырья (15 с).
- Изучение процесса совместного сжатия твердых древесных отходов и отходов лам. бумаги в различных соотношениях и построение графика для наиболее подходящей композиции сырья;
- Проведение сравнительного анализа основных параметров топочных устройств различной конструкции в котлоагрегате при сжигании полученного комбинированного брикета;
- Проведение теплового расчета котлоагрегата БКЗ 75-39 ФБ согласно нормативному методу [16];
- Проведение расчета вредных выбросов при сжигании полученного комбинированного топливного брикета в выбранном котлоагрегате;
- Проведение расчета экономического эффекта за счет перехода на сжигание комбинированного топливного брикета.

Результаты (Results)

В целях насыщения смеси сырья влагой и приданию ей свойств термовлагопластичности, была проведена пропарка. Смесь обогащалась насыщенным паром в течение определенного временного интервала. Была установлена зависимость повышения влажности смеси от времени пропарки у различных композиций сырья, данные приведены на рисунке 2.

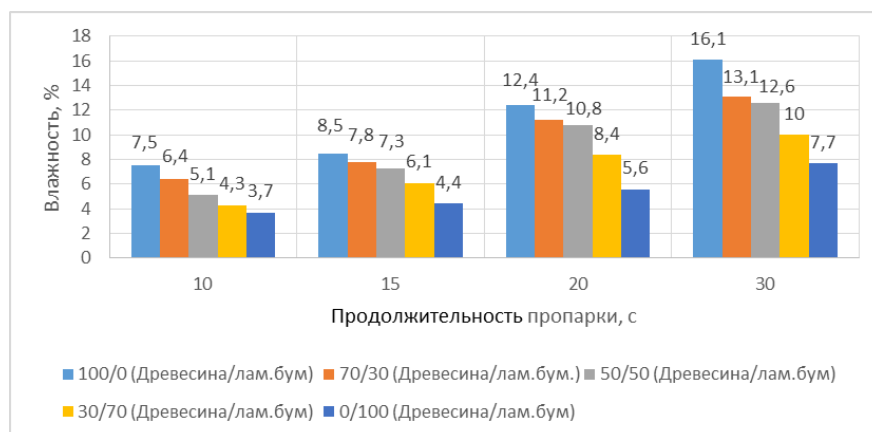


Рис. 2. Зависимость влажности сырья от продолжительности пропарки

Fig. 2. Dependence of raw material moisture content on steaming duration

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Дальнейший этап проведения эксперимента включал в себя процесс формирования топливного брикета с различными композициями сырья, из заранее подготовленной смеси. Прессование осуществлялось с помощью пресс-формы на универсальной испытательной установке Instron1121 в режиме одноосного сжатия до нагрузки $P = 4500 \text{ Н}$ с последующим эластическим восстановлением формы образца при скорости деформирования $V = 100 \text{ мм/мин}$ и различных значениях влажности и температуры. Результатом проведения данного этапа эксперимента – являлось определение зависимости плотности и прочности (в поперечном направлении) полученных образцов от переменных параметров влажности и температуры. Результаты представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Table 1

Результаты определения физико-механических параметров топливного брикета при температуре $t = 20^\circ\text{C}$

Results of determination of physical and mechanical parameters of fuel briquette at temperature $t = 20^\circ\text{C}$

Композиция №1 – 100% древесные отходы						
Время пропарки $\tau, \text{с}$	Исходная влажность сырья $W_{\text{исх}}, \%$	Высота брикета, мм	Диаметр брикета, мм	Среднее значение плотности брикета $\rho_{\text{ср}}, \text{кг/м}^3$	Среднее значение влажности полученного брикета $W_{\text{бр}}, \%$	Прочность на сжатие $\sigma_{\text{сж}}, \text{Н}$
10	7,5	13,4	14,2	679	4,6	0
15	8,5	15,4		646	5,7	0
20	12,4	16,1		635	8,1	0
Композиция №2 – 50% древесные отходы, 50% ламинированная бумага						
Время пропарки $\tau, \text{с}$	Исходная влажность сырья $W_{\text{исх}}, \%$	Высота брикета, мм	Диаметр брикета, мм	Среднее значение плотности брикета $\rho_{\text{ср}}, \text{кг/м}^3$	Среднее значение влажности полученного брикета $W_{\text{бр}}, \%$	Прочность на сжатие $\sigma_{\text{сж}}, \text{Н}$
10	5,1	12,2	14,2	715	2,4	50
15	7,3	12,9		710	3,9	50
20	10,8	13,5		704	4,5	50
Композиция №3 – 100% ламинированная бумага						
Время пропарки $\tau, \text{с}$	Исходная влажность сырья $W_{\text{исх}}, \%$	Высота брикета, мм	Диаметр брикета, мм	Среднее значение плотности брикета $\rho_{\text{ср}}, \text{кг/м}^3$	Среднее значение влажности полученного брикета $W_{\text{бр}}, \%$	Прочность на сжатие $\sigma_{\text{сж}}, \text{Н}$
10	3,7	12,1	14,2	801	1,5	0
15	4,4	12,2		794	1,9	0
20	5,6	12,7		787	2,1	0

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Ниже представлены графики (рис. 3-5) зависимости изменения средних значений плотности топливного брикета от влажности при комнатной температуре (20°C).

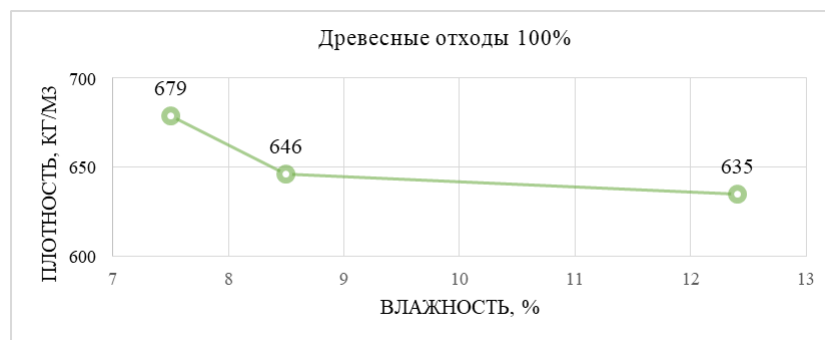


Рис. 3. Зависимость среднего значения плотности топливного брикета от влажности для композиции № 1 (100% древесных отходов)

Fig. 3. Dependence of average value of fuel briquette density on moisture content for composition № 1 (100% wood waste)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

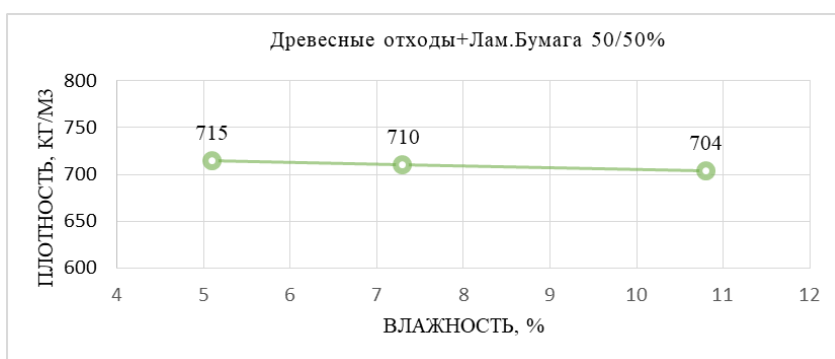


Рис. 4. Зависимость среднего значения плотности топливного брикета от влажности для композиции № 2 (50% древесных отходов, 50% отходов лам. бумаги)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

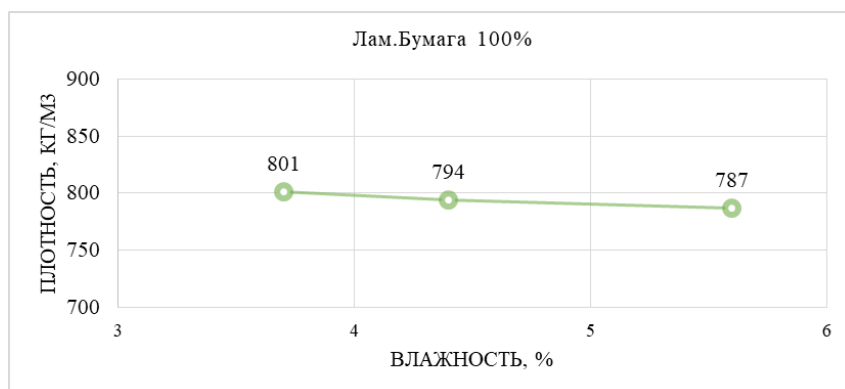


Рис. 5. Зависимость среднего значения плотности топливного брикета от влажности для композиции № 3 (100% отходов лам. бумаги)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 2

Table 2

Результаты определения физико-механических параметров топливного брикета при времени пропарки $\tau = 15$ с и температурах $t = 20, 50, 80^\circ\text{C}$

Results of determination of physical and mechanical parameters of fuel briquette at steaming time $\tau = 15$ s and temperatures $t = 20, 50, 80^\circ\text{C}$

Композиция №1 – 100% древесные отходы						
Температура в процессе прессования t, °С	Исходная влажность сырья W _{исх} , %	Высота брикета, мм	Диаметр брикета, мм	Среднее значение плотности брикета ρ _{ср} , кг/м ³	Среднее значение влажности полученного брикета W _{бр} , %	Прочность на сжатие σ _{сж} , Н
20	8,5	15,4	14,2	648	5,7	0
50		13,1	14,2	901	5,7	70
80		12,7	14,2	952	5,2	100
Композиция №2 – 50% древесные отходы, 50% ламинированная бумага						
Температура в процессе прессования t, °С	Исходная влажность сырья W _{исх} , %	Высота брикета, мм	Диаметр брикета, мм	Среднее значение плотности брикета ρ _{ср} , кг/м ³	Среднее значение влажности полученного брикета W _{бр} , %	Прочность на сжатие σ _{сж} , Н
20	7,3	12,9	14,2	710	3,9	50
50		12,4	14,2	958	4,4	150
80		11,8	14,2	1036	3,7	350

Композиция №3 – 100% ламинированная бумага						
Температура в процессе прессования t, °C	Исходная влажность сырья W _{исх} , %	Высота брикета, мм	Диаметр брикета, мм	Среднее значение плотности брикета $\rho_{\text{ср}}$, кг/м ³	Среднее значение влажности полученного брикета W _{бр} , %	Прочность на сжатие $\sigma_{\text{сж}}$, Н
20	4,4	12,2	14,2	794	1,9	0
50		11,9	14,2	990	1,7	100
80		11,2	14,2	1042	1,5	100

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Ниже представлены графики (рис. 6-8) зависимости изменения средних значений плотности топливного брикета от температуры (20, 50, 80°C) при одинаковом времени пропарки (15 с).

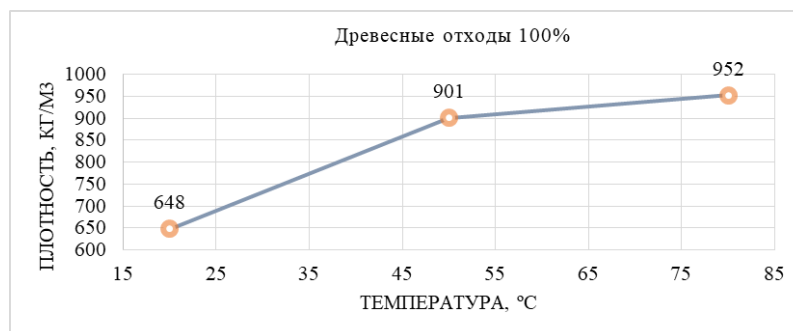


Рис. 6. Зависимость среднего значения плотности топливного брикета от температур (20, 50, 80°C) для композиции № 1 (100% древесных отходов)

Fig. 6. Dependence of the average value of fuel briquette density on temperatures (20, 50, 80°C) for composition № 1 (100% wood waste)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

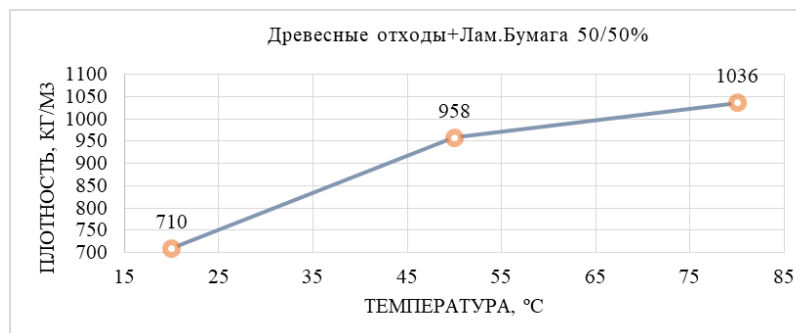


Рис. 7. Зависимость среднего значения плотности топливного брикета от температур (20, 50, 80°C) для композиции № 2 (50% древесных отходов, 50% отходов лам. бумаги)

Fig. 7. Dependence of average value of fuel briquette density on temperatures (20, 50, 80°C) for composition № 2 (50% wood waste, 50% lamp paper waste)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

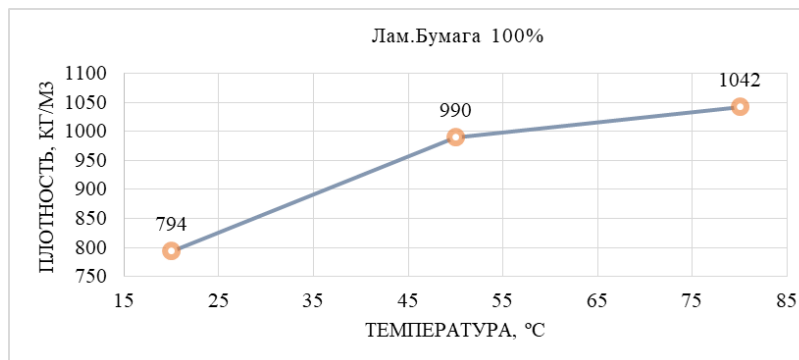


Рис. 8. Зависимость среднего значения плотности топливного брикета от температур (20, 50, 80°C) для композиции № 3 (100% отходов лам. бумаги)

Fig. 8. Dependence of the average value of fuel briquette density on temperatures (20, 50, 80°C) for composition № 3 (100% lamp paper waste)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

По результатам исследования видно, что влажность в меньшей степени влияет на плотность и прочность брикета, чем температура. При постоянной температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$ и различных временных интервалах пропарки (различной влажности), средняя плотность образцов, составила 719 кг/м^3 , при увеличении процентной влажности – плотность образцов снижалась для каждой из трех композиций. Показатель прочности на поперечное сжатие составил 50 Н только в композиции 50/50%, это обуславливается влагопластичностью древесных полимерных компонентов при взаимодействии с отходами ламинированной бумаги. В остальных двух композициях брикет имел нулевую прочность, переставая сохранять целостность уже в процессе извлечения его из пресс-формы.

При температурах 20, 50 и 80°C и одинаковом времени пропарки (15 секунд) средняя плотность образцов составила: 717 кг/м^3 при 20°C , 950 кг/м^3 при 50°C и 1010 кг/м^3 при 80°C . Самый высокий показатель прочности имела композиция 50/50% при температуре 80°C и составила 350 Н. Это объясняется изменением релаксационного состояния синтетического полимера (полиэтилена). При температуре выше 60°C полиэтилен марки 11503-070 (низкой плотности и высокого давления) переходит из стеклообразного релаксационного состояния в высокоэластическое, тем самым становится дополнительным связующим элементом при формировании брикета. Исходя из этого, брикет имеет высокую прочность и не сильно уступает в плотности образцу под номером 3, имея значение в 1036 кг/м^3 .

Резюмируя вышесказанное, для дальнейших исследований был выбран брикет с композицией древесных отходов и отходов ламинированной бумаги – 50/50%.

В дальнейшем были построены графики процесса сжатия древесных отходов и отходов ламинированной бумаги в соотношении 50/50% при различном времени пропарки сырья и температуре прессования. Результаты представлены на рисунках 9 и 10.

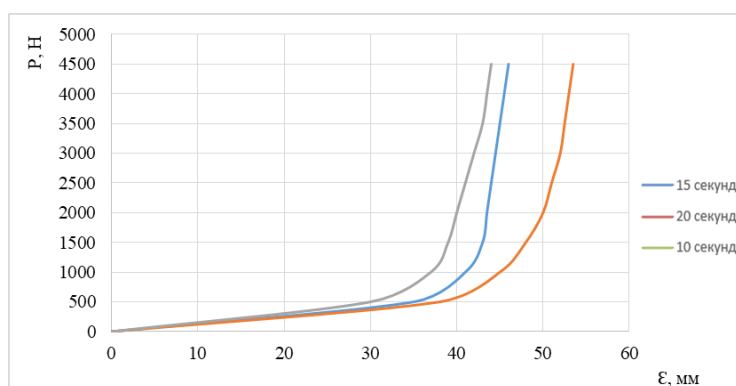


Рис. 9. График процесса сжатия измельченных древесных отходов и отходов ламинированной бумаги [1] в соотношении 50/50% при постоянной температуре (20°C) и различном времени пропарки сырья (10с, 15с, 20с)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

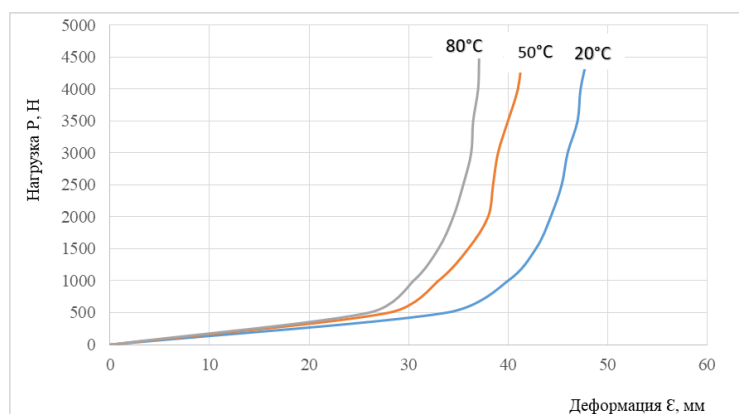


Рис. 10. График процесса сжатия измельченных древесных отходов и отходов ламинированной бумаги в соотношении 50/50% при различных температурах (20, 50, 80°C) и постоянном времени пропарки сырья (15 с)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Следующий этап исследования предусматривал анализ топок различной конструкции в котлоагрегате, с целью определения оптимальной топочной конструкции для сжигания полученного комбинированного брикета в соотношении древесных отходов и отходов ламинированной бумаги 50/50%. Для корректного сравнения был выбран котлоагрегат с одинаковыми номинальными параметрами (паропроизводительностью и давлением пара). По результатам расчета материального баланса, теплового баланса и расчету топочных камер, были получены следующие результаты, представленные в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Результаты расчетов котлоагрегата с различными топочными камерами

Results of calculations of boiler unit with different furnace chambers

Параметр	НТВ	Факельное сжигание	Слоевое сжигание	Кипящий слой
Паропроизводительность D , кг/с	20,9	20,9	20,9	20,9
Давление перегретого пара P , МПа	3,9	3,9	3,9	3,9
Температура уходящих газов $\vartheta_{\text{ух}}$, °C	120	120	150	145
Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки α	1,2	1,2	1,4	1,3
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	21	21	21	21
Сумма тепловых потерь $\sum q$, %	7,15	6,72	13,4	13,9
КПД η , %	92,85	93,28	86,6	86,1
Расход топлива B , кг/с	2,94	2,88	2,95	2,7
Адиабатная температура горения t_a , °C	1658	1854	1101	1263
Температура газов на выходе из топки ϑ'' , °C	1064	963	862	801
Теплонапряжение топочного объема q_v , кВт/м ³	152	67	72	115

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

По результатам, представленным в таблице 3, можно сделать вывод, что камерное сжигание (НТВ, факельное) является наиболее предпочтительным, так как, КПД котлоагрегата находится в пределах 92-93%, в отличие от слоевого сжигания, где КПД располагается в диапазоне 86-87%. Также, слоевое сжигание в реальных условиях ограничено паропроизводительностью в 25-30 т/ч. Для повышения паропроизводительности, в случае слоевой топочной камеры, требуются огромные габариты самой топки, и как следствие, самого котлоагрегата. При камерном сжигании, адиабатная температура в низкотемпературной вихревой топке (НТВ) [17-18] составляет 1658°C, что меньше на 200°C по сравнению с факельным сжиганием в топке стандартной конструкции. Это дает пониженное образование термических оксидов азота, так как их формирование зависит от величины температуры в зоне активного горения. Также, при использовании низкотемпературной вихревой топочной камеры, упрощается процесс подготовки топлива, так как отсутствует полноценная система пылеприготовления, соответственно, уменьшаются затраты на электроэнергию на размол до более мелкой фракции. Помимо этого, в низкотемпературной вихревой топке, используется принцип ступенчатого сжигания, что дополнительно понижает образование оксидов азота. При использовании НТВ технологии, также, исключается шлакование и загрязнение топочных и конвективных поверхностей нагрева.

Все эти факторы делают низкотемпературную вихревую топочную камеру лучшим выбором среди конструкций топочных камер для сжигания полученного комбинированного брикета.

Был также проведен расчет вредных выбросов оксидов азота при сжигании комбинированного брикета, в соотношении сырья 50/50%, в топках различной конструкции. Результаты приведены на рисунке 11.

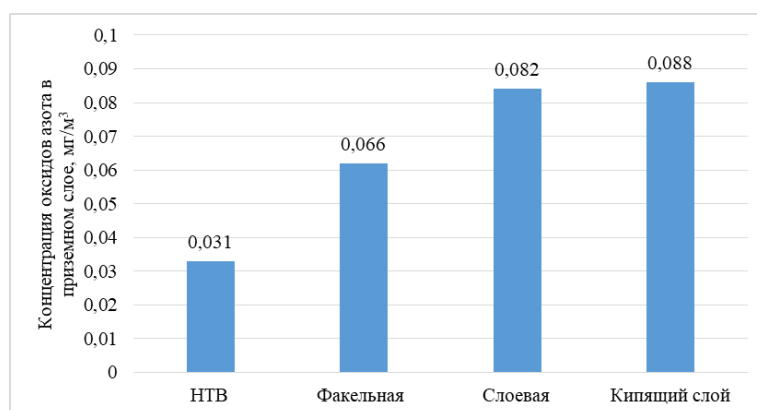


Рис. 11. Вредные выбросы оксидов азота при сжигании полученного брикета 50/50% в топках различной конструкции

Fig. 11. Harmful emissions of nitrogen oxides at combustion of the obtained 50/50% briquette in furnaces of different design

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

По полученным данным видно, что при сжигании топливного брикета 50/50% в низкотемпературной вихревой топке за счет пониженной температуры в зоне активного горения и ступенчатого сжигания, образуется наименьшее количество вредных выбросов оксидов азота.

Полученная ранее низшая теплота сгорания комбинированного брикета, в соотношении сырья 50/50%, равная 21 МДж/кг [1], является высокой для подобного вида топлива. Сравнительная диаграмма значений низших теплот сгорания различных видов твердых топлив представлена на рисунке 12.

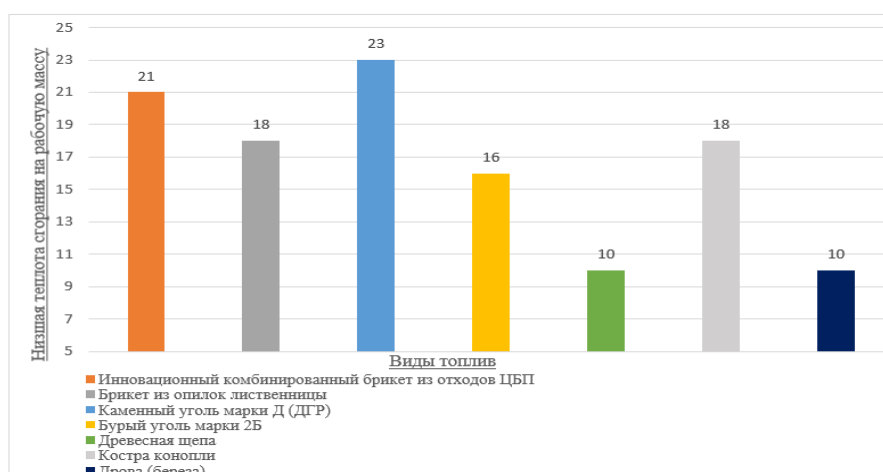


Рис. 12. Сравнение значений низших теплот сгорания различных видов топлив

Fig. 12. Comparison of values of lower calorific values of different fuels

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В качестве примера, для сжигания был выбран котлоагрегат БКЗ-75-39 ФБ с низкотемпературной вихревой топкой Померанцева.

Для данного котла был проведен ряд теплотехнических расчетов. Результаты расчета теплового баланса котлоагрегата БКЗ-75-39ФБ представлены в таблице 4.

Таблица 4

Table 4

Результаты расчета теплового баланса БКЗ-75-39ФБ

Results of calculation of heat balance of BKZ-75-39FB

Наименование параметра	Значение
Низшая теплота сгорания топлива Q_i^* , МДж/кг	21
Сумма тепловых потерь $\sum q$, %	7,15
КПД котла η , %	92,85
Расчетный расход топлива B_p , кг/с	2,86
Температура уходящих газов θ_{yx} , °C	120

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 13 представлена диаграмма расчетных температур дымовых газов за поверхностями нагрева котла БКЗ-75-39ФБ [16].

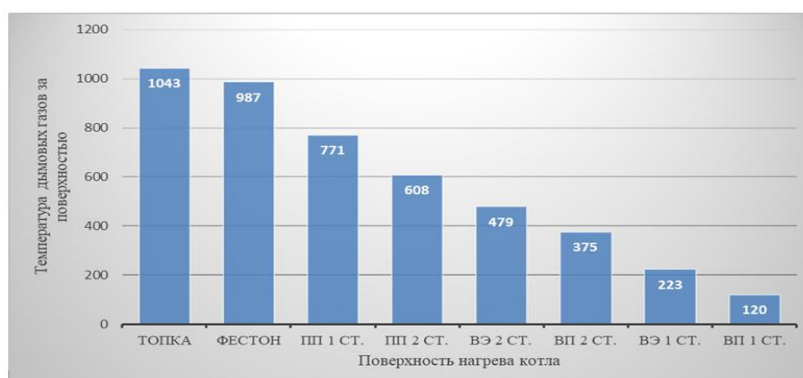


Рис. 13. Расчетные температуры дымовых газов за поверхностями нагрева *Fig. 13. Calculated flue gas temperatures behind the heating surfaces*

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В дальнейшем был проведен сравнительный анализ расчетных параметров котлоагрегата БКЗ-75-39ФБ на полученном комбинированном брикете 50/50% и древесном брикете из опилок лиственницы с влажностью 4%. Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5

Table 5

Сравнение расчетных параметров котлоагрегата при сжигании брикетов

Comparison of design parameters of boiler unit at briquette combustion

Параметр	Комбинированный брикет 50/50%	Древесный брикет из опилок лиственницы
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	21	18
Объем дымовых газов V_r , м ³ /кг	6,4	6,9
Температура уходящих газов ϑ_{yx} , °C	120	120
Потери тепла с ух. газами q_2 , %	5,2	6,3
Сумма тепловых потерь в котле, Σq , %	7,15	8,25
КПД котла η , %	92,85	91,75
Расчетный расход топлива V_p , кг/с	2,86	3,5

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

За счет уменьшения расхода топлива возрастет экономический эффект использования инновационного комбинированного брикета, при таких же номинальных параметрах котлоагрегата. Данные расчета снижения расхода топлива представлены в таблице 6.

Таблица 6

Table 6

Экономический эффект за счет снижения расхода топлива

Economic effect due to reduced fuel consumption

Параметр	Комбинированный брикет 50/50%	Древесный брикет из опилок лиственницы
Стоимость 1 тонны топлива, руб.	6500	6500
Годовой расход топлива, т/год	90193	110376
Затраты на топливо в год, без учета логистики, млн. руб.	586,3	717,4

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Годовая экономия за счет снижения расхода топлива составит 131,1 млн. рублей.

Заключение (Conclusions)

1. Определены оптимальные параметры сырья для формирования комбинированного брикета, состоящего из твердых древесных отходов и отходов ламинированной бумаги: температура 80°C и влажность 7,3%;

2. Определено влияние теплотехнических характеристик сырья (температура и влажность) на физико-механические свойства брикета (плотность и прочность) при различных композициях сырья. Оптимальным являлся брикет с соотношением сырья 50/50%, имеющий плотность 1036 кг/м³ и прочность на поперечное сжатие 350 Н;

3. Проанализирован график процесса сжатия двух видов сырья в соотношении 50/50% в зависимости от различных значений температуры и влажности. Наиболее быстрое сжатие происходило при температуре 80°C и времени пропарки 10 секунд.

4. Проведен анализ топок различной конструкции в котлоагрегате и была выбрана низкотемпературная вихревая топка для сжигания полученного комбинированного брикета 50/50%. Данный выбор обусловлен тем, что в НТВ-топке небольшая, относительно факельного способа, температура в зоне активного горения и применяется способ ступенчатого сжигания, что, в сумме, дает пониженные выбросы оксидов азота, равные 0,031 мг/м³.

5. Выбрана энергоустановка для сжигания полученного брикета – котлоагрегат БКЗ-75-39 ФБ с низкотемпературной вихревой топкой Померанцева, имеющий КПД 92,85%.

6. При сравнительном анализе сжигания полученного брикета и стандартного древесного брикета из опилок лиственницы, КПД котельной установки увеличился более чем на 1% и на 21% снизился расход топлива. Эти факторы приводят к снижению экономических затрат на потребление топлива котлоагрегатом, а также, повышается общая эффективность работы котла и вспомогательного оборудования.

7. Экономический эффект с переходом на полученный комбинированный брикет составит 131,1 млн. рублей в год.

Литература

1. Исследование физико-химических характеристик альтернативного топлива, содержащего синтетические полимеры / В. А. Рыжиков, О. А. Ерохина, Э. Л. Аким, П. В. Луканин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 6. – С. 180-194. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-180-194. – EDN WXRKVJ.

2. Сперанская, О., Понизова, О., Цитцер, О., Гурский, Я. Пластик и пластиковые отходы в России: ситуация, проблемы и рекомендации. Международная Сеть по Ликвидации Загрязнителей (International Pollutants Elimination Network), 2021.

3. Plastic Overshoot Day – Report 2024, EA-Earth Action, 2024.

4. Bengtsson A, Bengtsson J, Olsson C, Sedin M, Jedvert K, Theliander H, Sjöholm E (2018) Improved yield of carbon fibres from cellulose and kraft lignin. *Holzforschung* 72:1007–1016.

5. E. L. Akim, Yu. G. Mandre, and A. A. Pekarets, “Changes in the relaxation state of polymeric components of wood during its high-temperature biorefining,” *Khim. Volokna*, No. 3, 14–18 (2019).

6. Перспективы технологии совместного сжигания биомассы и угля на объектах энергетики / Е. С. Дремичева, Э. Р. Зверева, Ф. И. Бурганова, Л. О. Зверев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 119-130. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-119-130. – EDN DRPGTC.

7. Detlef P. van Vuuren, Elke Stehfest, David E.H.J. Gernaat, Jonathan C. Doelman, Maarten van den Berg, Mathijs Harmsen, Harmen Sytze de Boer, Lex F. Bouwman, Vassilis Daioglou, Oreane Y. Edelenbosch, Bastien Girod, Tom Kram, Luis Lassaletta, Paul L. Lucas, Hans van Meijl, Christoph Müller, Bas J. van Ruijven, Sietske van der Sluis, Andrzej Tabeau, «Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm», *Global Environmental Change*, Volume 42, 2017, Pages 237-250, ISSN 0959-3780.

8. Совместная переработка отходов картонно-бумажной макулатуры, содержащих целлюлозу и синтетические полимеры, и твердых древесных отходов, входящих в состав топливного брикета / В. А. Рыжиков, Э. Л. Аким, О. А. Ерохина, А. А. Пекарец // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: Материалы VII Международной научно-технической конференции имени профессора В.И. Комарова, Архангельск, 14–16 сентября 2023 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – RUS: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2023. – С. 65-69.

9. Упруго-релаксационные свойства древесины лиственницы и их роль при получении древесных и древесно-угольных брикетов / А. А. Пекарец, О. А. Ерохина, В. В. Новожилов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 1(373). – С. 200-208. – DOI 10.37482/0536-1036-2020-1-200-208. – EDN WVFHPC.

10. Hansen E., Panwar R., Vlosky R. The Global Forest Sector: Changes, Practices and Prospects // NY: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2017. P. 462.

11. Forest Products Annual Market Review 2021-2022, UNECE, 70 p.; Forest Products Annual

Market Review 2019-2020 - Forestry and Timber – UNECE, 82p. ISBN 978-92-1-117257-7.

12. Ежегодный обзор рынка лесных товаров, 2018–2019 годы: Женева: ЕЭК ООН, 2020- 173с. ISBN 978-92-1-004516.

13. Forest Products Annual Market Review 2023-2024, UNECE, 53p. ISBN 978-92-1-003184-4.

14. Луканин П.В., Федорова О.В., Пекарец А.А., Аким Э.Л. Особенности сжигания биотоплива и их взаимосвязь с упруго-релаксационными свойствами исходного сырья и его химическим составом // Матер. VI Междун. научно-технич. конфер. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов», 09-11 сентября 2021 г. Архангельск, 2021. С. 383-388.

15. Технология полимерных материалов / А.Ф. Николаев, В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов [и др.]. СПб.: Профессия, 2008. 544 с.

16. АО «ЕЭС РОССИИ» Акционерное общество открытого типа всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт (ВТИ). Тепловой расчет котлов. Издание третье, переработанное и дополненное. Санкт-Петербург, 1998.

17. Померанцев, В. В. Топки скоростного горения для древесного топлива [Текст] / канд. техн. наук В. В. Померанцев; М-во тяжелого машиностроения СССР. Главкотлотурбопром. Центр. науч.-исслед. ин-т им. И. И. Ползунова. - Москва; Ленинград: [Ленингр. отд-ние] Машгиза, 1948 (Л.: тип. "Профинтерн"). – 74 с.

18. А.А. Тринченко, А.П. Парамонов. Внедрение низкотемпературного вихревого сжигания для энергетического использования каменных углей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 4(231). 2015. – 175с

Авторы публикации

Рыжиков Владимир Александрович – ст. преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики СПбГУПТД ВШТЭ, г. Санкт-Петербург, Россия. ryzhikov_vladimir@bk.ru

Ерохина Ольга Александровна – ст. преподаватель кафедры ТЦКМ, зав. лаб. СПбГУПТД ВШТЭ, г. Санкт-Петербург, Россия.

Аким Эдуард Львович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры ТЦКМ СПбГУПТД ВШТЭ, г. Санкт-Петербург, Россия.

Луканин Павел Владимирович – д-р техн. наук, профессор, первый проректор СПбГУПТД, г. Санкт-Петербург, Россия.

References

1. Research of physical and chemical characteristics of alternative fuel containing synthetic polymers / V. A. Ryzhikov, O. A. Erokhina, E. L. Akim, P. V. Lukanin // Izvestia vysokikh uchebnykh obrazovaniya. Problems of Power Engineering. - 2024. - T. 26, № 6. - С. 180-194. - DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-180-194. - EDN WXRKVJ.

2. Speranskaya, O., Ponizova, O., Zitzer, O., Gursky, J. Plastic and plastic waste in Russia: situation, problems and recommendations. International Pollutants Elimination Network, 2021.

3. Plastic Overshoot Day – Report 2024, EA-Earth Action, 2024.

4. Bengtsson A, Bengtsson J, Olsson C, Sedin M, Jedvert K, Theliander H, Sjöholm E (2018) Improved yield of carbon fibres from cellulose and kraft lignin. *Holzforschung* 72:1007–1016.

5. E. L. Akim, Yu. G. Mandre, and A. A. Pekarets, “Changes in the relaxation state of polymeric components of wood during its high-temperature biorefining,” *Khim. Volokna*, No. 3, 14–18 (2019).

6. Prospects of technology of biomass and coal co-combustion at power engineering facilities / E. S. Dremicheva, E. R. Zvereva, F. I. Burganova, L. O. Zverev // Izvestiya vysokikh uchebnykh obrazovaniya. Problems of power engineering. - 2021. - T. 23, № 1. - С. 119-130. - DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-119-130. - EDN DRPGTC.

7. Detlef P. van Vuuren, Elke Stehfest, David E.H.J. Gernaat, Jonathan C. Doelman, Maarten van den Berg, Mathijs Harmsen, Harmen Sytze de Boer, Lex F. Bouwman, Vassilis Daioglou, Oreane Y. Edelenbosch, Bastien Girod, Tom Kram, Luis Lassaletta, Paul L. Lucas, Hans van Meijl, Christoph Müller, Bas J. van Ruijven, Sietske van der Sluis, Andrzej Tabeau, «Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm», *Global Environmental Change*, Volume 42, 2017, Pages 237-250, ISSN 0959-3780.

8. Joint processing of waste cardboard and paper waste containing cellulose and synthetic polymers and solid wood waste, which is part of the fuel briquette / V. A. Ryzhikov, E. L. Akim, O. A. Erokhina, A. A. Pekarets // Problems of mechanics of cellulose and paper materials: Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference named after Professor V. I. Komarov. I. Komarov, Arkhangelsk,

September 14-16, 2023 / Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov”. - RUS: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2023. - C. 65-69.

9. Elastic-relaxation properties of larch wood and their role in obtaining wood and charcoal briquettes / A. A. Pekarets, O. A. Erokhina, V. V. Novozhilov [et al.] // Izvestia vysokikh uchebnykh uchebnykh uchebnykh vuzdaniya. Forestry journal. - 2020. - № 1(373). - C. 200-208. - DOI 10.37482/0536-1036-2020-1-200-208. - EDN WVFHPC.

10. Hansen E., Panwar R., Vlosky R. The Global Forest Sector: Changes, Practices and Prospects // NY: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2017. P. 462.

11. Forest Products Annual Market Review 2021-2022, UNECE, 70 p.; Forest Products Annual Market Review 2019-2020 - Forestry and Timber – UNECE, 82p. ISBN 978-92-1-117257-7.

12. Annual Forest Products Market Review, 2018-2019: Geneva: UNECE, 2020- 173 pp. ISBN 978-92-1-004516.

13. Forest Products Annual Market Review 2023-2024, UNECE, 53p. ISBN 978-92-1-003184-4.

14. Lukanin, P.V.; Fedorova, O.V.; Pekarets, A.A.; Akim, E.L. Features of biofuel combustion and their relationship with the elastic-relaxation properties of feedstock and its chemical composition // Mater. VI International Scientific and Technical Conference. “Problems of mechanics of cellulose and paper materials”, September 09-11, 2021, Arkhangelsk, 2021. C. 383-388.

15. Technology of polymeric materials / A.F. Nikolaev, V.K. Kryzhanovskiy, V.V. Burlov [et al. Burlov [et al.] SPb.: Profession, 2008. 544 c.

16. JSC UES OF RUSSIA Open Joint Stock Company All-Russian Heat Engineering Research Institute (VTI). Thermal calculation of boilers. Third edition, revised and supplemented. St. Petersburg, 1998.

17. Pomerantsev, V. V. Furnaces of high-speed combustion for wood fuel [Text] / Cand. Sci. (Techn.) V. V. Pomerantsev; Ministry of Heavy Engineering of the USSR. Glavkotloturboprom. Center. scientific-research institute named after I. I. Polzunov. I. I. Polzunov. - Moscow; Leningrad: [Leningrad Branch] Mashgiza, 1948 (L.: tip. “Profintern”). - 74 c.

18. A.A. Trinchenko, A.P. Paramonov. Implementation of low-temperature vortex combustion for power utilization of hard coal // Scientific and Technical Bulletins of St. Petersburg State Polytechnic University. 4(231). 2015. – 175c.

Authors of the publication

Vladimir A. Ryzhikov – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russia. ryzhikov_vladimir@bk.ru

Olga A. Erokhina – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russia.

Eduard L. Akim – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russia.

Pavel V. Lukanin – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 17.03.2025 г.

Отредактировано 31.03.2025 г.

Принято 11.04.2025 г.