



ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА, СОДЕРЖАЩЕГО СИНТЕТИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРЫ

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. Санкт-Петербург, Россия.

ryzhikov_vladimir@bk.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** В данной работе приводятся исследования физико-химических характеристик комбинированных топливных брикетов, состоящих из твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, полученных по инновационной технологии. **ЦЕЛЬЮ** исследования является разработка технологии переработки и утилизации отходов целлюлозно-бумажной промышленности, содержащих синтетические полимеры, путем их совместного использования в виде топливных комбинированных брикетов 2-го поколения, состоящих из твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, с последующей утилизацией в котельной установке с низкотемпературной вихревой топкой. Снижение до минимума вреда для экологической составляющей и повышение максимальной энергетической и экономической эффективности. **МЕТОДЫ.** Для реализации поставленной цели, в работе были использованы следующие методы исследования: изучение термопластичности синтетических полимеров и влагопластичности полимерных компонентов древесины в процессе формирования брикета, определение эмпирическим путем оптимальной композиции комбинированного брикета, для получения высокой теплотворной способности топлива, низкой концентрации вредных выбросов, высокой прочности и плотности готового продукта, определение низшей теплоты сгорания полученного брикета с помощью калориметрической установки, а так же, конечной зольности с использованием муфельной печи. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье представлены результаты проведенных исследований и экспериментов, в частности, полученных значений плотности, прочности и теплотворной способности полученного брикета при различных композициях исходного сырья. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Полученные, в ходе проведения работы, топливные брикеты имеют высокие показатели по плотности, прочности и теплотворной способности топлива. Помимо этого, инновационная технология переработки древесных отходов и отходов упаковочной ламинированной бумаги позволит снизить до минимума вред для экологической составляющей и повысить максимальную энергетическую и экономическую эффективность. Использование полученного топлива и технологии его производства, даст возможность снизить нагрузку на полигоны с ныне не утилизируемыми отходами и использовать полученную энергию топлива на собственные нужды.

Ключевые слова: целлюлоза; топливные брикеты; биотопливо; синтетические полимеры; промышленные отходы; отходы деревообработки; экология.

Для цитирования: Рыжиков В.А., Ерохина О.А., Аким Э.Л., Луканин П.В. Исследование физико-химических характеристик альтернативного топлива, содержащего синтетические полимеры // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 180-194. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-180-194.

RESEARCH OF PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF ALTERNATIVE FUEL CONTAINING SYNTHETIC POLYMERS

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

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of

Abstract: *RELEVANCE.* This paper presents the research of physical and chemical characteristics of combined fuel briquettes consisting of solid wood waste and laminated paper production waste obtained by innovative technology. *THE GOAL* of the research is to develop a technology for processing and utilization of pulp and paper industry waste containing synthetic polymers by their joint use in the form of combined fuel briquettes of the 2nd generation, consisting of solid wood waste and laminated paper production waste, with subsequent utilization in a boiler plant with a low-temperature vortex furnace. Minimizing harm to the environmental component and maximizing energy and economic efficiency. *METHODS.* To realize the set goal, the following research methods were used in the work: study of thermoplasticity of synthetic polymers and moisture plasticity of polymeric components of wood in the process of briquette formation, determination empirically of the optimal composition of the combined briquette to obtain high calorific value of fuel, low concentration of harmful emissions, high strength and density of the finished product, determination of the lower heat of combustion of the obtained briquette with the help of calorimetric installation. *RESULTS.* The paper presents the results of the conducted research and experiments, in particular, the obtained values of density, strength and calorific value of the obtained briquette at different compositions of feedstock. *CONCLUSION.* The fuel briquettes obtained in the course of work have high indicators of density, strength and calorific value of fuel. In addition, the innovative technology of processing wood waste and waste packaging laminated paper will minimize the harm to the environmental component and increase the maximum energy and economic efficiency. The use of the obtained fuel and the technology of its production will make it possible to reduce the load on landfills with currently unutilized waste and use the obtained fuel energy for own needs.

Keywords: cellulose; fuel briquettes; biofuels; synthetic polymers; industrial waste; wood waste; ecology.

For citation: Ryzhikov V.A., Erokhina O.A., Akim E.L., Lukanin P.V. Research of physical and chemical characteristics of alternative fuel containing synthetic polymers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 180-194. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-180-194.

Введение (Introduction)

Актуальность данной работы основывается на том, что в России и мире, на данный момент, активно идет обсуждение перехода к углеродной нейтральности, что означает сокращение до нуля выбросов углекислого газа в процессе производственной деятельности или их компенсацию за счет углеродно-отрицательных проектов [1-2]. Процесс минимизации техногенного влияния на окружающую среду и переход на чистые технологии стал уже не трендом, а неизбежной реальностью [3-5]. В России в июле 2020 года, был подписан Указ Президента о национальных целях развития России на период до 2030 года. Новый документ существенно усиливает значимость экологической повестки. В соответствие с ним в ближайшие десятилетия страна будет двигаться по «зеленому» направлению. В числе главных целей станет создание устойчивой системы обращения с твердыми коммунальными отходами, снижение вдвое вредных выбросов в воздух, оказывающих наибольшее негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Помимо этого, должны быть ликвидированы наиболее опасные объекты накопленного вреда природе и проведено экологическое оздоровление водных объектов.

В связи с проблемой перехода к низкоуглеродной циркулярной биоэкономике на сегодняшний день актуальна задача переработки отходов производства ламинированной бумаги, содержащих синтетические полимеры [6]. В настоящее время, при производстве ламинированной бумаги, не всегда есть возможность утилизировать эти отходы (обрезки, брак), и их чаще всего захоранивают на полигонах, что не только увеличивает площади свалок (полигонов), но и приводит при их гниении к дополнительным выбросам диоксида углерода без получения полезной энергии. Таким образом, эти, достаточно крупнотоннажные отходы целлюлозно-бумажной промышленности, ни в России, ни в мире пока что не нашли своего места в процессе переработки с целью получения полезной энергии или топлива [6-7].

Объем потребления бумаги и картона в мире - свыше 430 млн тонн, а объем потребления крупнотоннажных синтетических полимеров в мире - свыше 360 млн тонн. Основным сырьем для производства синтетических полимеров является нефть, мировая добыча которой составляет около 4,5 млрд тонн в год (сернистых соединений в различных видах нефтей может быть более 10-ти процентов, хотя обычно этот показатель не превышает шести процентов). Таким образом, на переработку в синтетические полимеры расходуется лишь 8% нефти, а 92% прямо или косвенно сжигается как топливо с выделением не только углекислого газа, но и сернистых соединений [8-11].

Синтетические полимеры, в обиходе называемые пластиком - один из самых распространенных материалов, используемых в современной жизни. Самым большим использованием пластика является упаковка (около 30% мирового объема производства пластика в год), так как они очень функциональны в качестве упаковочного материала. Далее следует их использование в строительстве и на транспорте, на которые приходится примерно 17% и 14% соответственно (ЮНЕП, 2018а). Производство синтетических полимеров («пластика») в 2018 году составило около 360 млн тонн, из них повторно перерабатывается из-за высоких затрат, связанных с переработкой менее 10% пластиковых отходов. Прогнозируется, что к 2045 году объем пластиковых отходов будет превышать 340 млн тонн в год [12-14]. Эта тенденция прямо противоречит высокому уровню вторичной переработки бумаги - в целом по миру использование вторичного волокна уже свыше 10 лет назад превысило уровень использования первичного волокна. Одним из путей уменьшения пластикового загрязнения мира является создание биоразлагаемой упаковки, однако анализ всего жизненного цикла такой упаковки показывает целесообразность утилизации и биоразлагаемой упаковки как одного из компонентов биотоплива [15].

4 октября 2022 ФАО ООН опубликовала «Глобальный прогноз развития лесного сектора до 2050 года», важнейшим разделом которого является раздел «Древесина для производства энергии». В нем указывается, что в 2020 году 2,3 миллиарда человек по-прежнему полагались на древесное топливо в качестве основного источника энергии для приготовления пищи и отопления. Учитывая, что в ноябре 2022 года население Земли превысило 8 миллиардов человек, четверть населения Земли зависят от древесного топлива.

В прогнозе указывается, что древесное топливо останется основным источником энергии для многих домохозяйств в странах с развивающейся экономикой до 2050 года, но многие сценарии предполагают, что темпы роста потребления замедлятся. Мировое потребление топливной древесины из лесов в 2050 году может составить от 2,1 до 2,7 миллиарда кубометров по сравнению с 1,9 миллиарда кубометров в 2020 году, увеличившись на 11-42 процента [6].

Четверть века назад в мире и в России стало производиться биотопливо второго поколения – древесные пеллеты и брикеты; за эти годы их производство в мире достигло 50 млн тонн [6-7]. Благодаря своим специфическим свойствам и эффективным системам сжигания они нашли широкое применение и в быту – для отопления индивидуальных домов, и на электростанциях, для совместного сжигания с каменным углем. Мировая добыча каменного угля составляет около 7,5 млрд тонн в год; содержание общей серы в углях колеблется в основном от 0,2 до 10%. При этом совместное сжигание каменного угля с древесными пеллетами рассматривается как один из важнейших путей уменьшения карбонового следа угольных электростанций.

В 2020 году Россия экспортировала 2,32 млн тонн древесных пеллет – 6% от мирового объема производства пеллет. (ФАО 2019 - Древесные пеллеты и прочие агломераты – 46 миллионов тонн). В первом полугодии 2021 года производство топливных пеллет увеличилось на 19%, цены на гранулы прибавили 17%. Мировым центром производства и потребления топливных древесных гранул является регион ЕЭК, на долю которого приходится 80 % мирового производства пеллет; а доля стран ЕЭК в ее мировом экспорте составляет 90 %.

В 2019 году в регионе ЕЭК было произведено 36,7 млн т топливных древесных гранул (+8,8 %), при этом показатель их потребления является самым высоким в Европейском субрегионе в то время, как Северная Америка подтвердила свою лидирующую позицию в качестве крупнейшего мирового экспортера этой продукции [8-10].

Целью исследования является разработка технологии переработки и утилизации отходов целлюлозно-бумажной промышленности, содержащих синтетические полимеры, путем их совместного использования в виде топливных комбинированных брикетов 2-го поколения, состоящих из твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, с последующей утилизацией в котельной установке с низкотемпературной вихревой топкой [16-17]. Снижение до минимума вреда для

экологической составляющей и повышение максимальной энергетической и экономической эффективности.

Научная значимость исследования заключается в том, что впервые была показана возможность создания топливных брикетов путем совместной переработки твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, содержащих синтетические полимеры. Была установлена возможность реализации, в процессе экструзии, термо-влагопластичности полимерных компонентов древесины и термопластичности синтетических полимеров. При определенных условиях, в процессе формирования брикета, данные композиционные материалы, в частности синтетические полимеры, входящие в состав отходов ламинированной бумаги, переходят из стеклообразного релаксационного состояния в высокоэластическое и, в последствии, возвращаются в исходное стеклообразное состояние через определенный промежуток времени, достигнув температуры стеклования. Этот фактор влечет за собой улучшенные прочностные свойства получаемых брикетов, а также, повышенную плотность готового продукта. Дальнейший процесс предусматривает измельчение топливного комбинированного брикета в дробленку с помощью специализированной мельничной установки и последующим сжиганием в котлоагрегате с низкотемпературной вихревой топкой Померанцева. В совокупности все это дает высокий энергетический и экономический эффект, а также, значительно повышает экологическое благополучие окружающей среды, и позволяет использовать полученную тепловую энергию, в том числе, и на собственные нужды предприятия.

В связи с нынешней экологической обстановкой по всему миру, в частности по загрязнению планеты отходами производств и вредными выбросами в атмосферу такими как: оксиды азота, серы и двуокиси углерода, данное исследование и разработка имеют высокую **практическую значимость** для предприятий деревообрабатывающей и упаковочной промышленности.

Материалы и методы (Materials and methods)

Проведенные исследования включали в себя следующие этапы и методы:

- Измельчение отходов ламинированной бумаги до мелкой фракции, с помощью мельничной установки;
- Проведение ситового анализа для определения гранулометрического состава сырья;
- Определение влажности исходного сырья и его высушивание с помощью влагомера AND MF-50;
- Формирование навески с различными композициями сырья;
- Пропарка полученной смеси насыщенным паром в течение определенного временного промежутка для достижения необходимой влажности;
- Предварительный нагрев пресс-формы до 100 градусов Цельсия для использования высокой температуры в процессе прессования сырья в топливный брикет;
- Формирование топливного брикета в лабораторных условиях с помощью автоматизированного пресса (INSTRON-1121) и под воздействием высокой температуры с дальнейшим определением плотности, прочности и коэффициента сжатия брикета;
- Исследование упруго-релаксационных свойств смесей древесного компонента и отходов ламинированной бумаги, содержащих синтетические полимеры;
- Определение параметров, обуславливающих экструзируемость смеси;
- Определение конечной влажности и зольности рабочей массы топлива;
- Определение низшей теплоты сгорания (теплотворной способности) топлива с помощью лабораторной установки, состоящей из калориметрической бомбы и калориметра;
- Проведение теплотехнических расчетов, с целью определения энергетической и экологической эффективности.

Перед началом проведения исследования, необходимо подготовить исходное сырье, к которому относится древесная мука опилок лиственницы и отходы производства ламинированной бумаги, представленные на рисунке 1.



Рис. 1 Отходы производства упаковочной Fig. 1 Packaging laminated paper production waste ламинированной бумаги

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

Первым этапом при подготовки исходного сырья – является измельчение материала с помощью лабораторной дисковой мельницы, представленной на рисунке 2.



Рис. 2 Лабораторная дисковая мельница

Fig. 2 Laboratory disk mill

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

Далее, необходимо провести ситовый анализ, полученных измельченных отходов. Для корректного определения гранулометрического состава топлива, используется 20 грамм полученного материала. Данный материал пропускается через вертикально установленные друг под другом сита с размерами ячеек: R5000, R2000, R1000, R500.

Следующим шагом подготовки сырья является формирование навески смеси двух видов сырья в различных композициях общей массой – 2 грамма.

Для того, чтобы получить корректные эмпирические данные в процессе проведения эксперимента, необходимо было выровнять влажности двух видов сырья. Для этого использовалось специальное устройство – влагомер ANDMF – 50, представленный на рисунке 3.



Рис. 3 Влагомер ANDMF – 50

Fig. 3 Moisture meter ANDMF-50

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

Древесные отходы и отходы ламинированной бумаги были высушены до 3,3 % влажности.

Дальнейшим этапом эксперимента является пропарка сырья в различных композициях. Смесь подвергается воздействию насыщенного пара в течение определенного временного промежутка.

Следующий этап экспериментальной части заключался в формировании топливного брикета с различными композициями сырья, из заранее подготовленной смеси, на автоматизированном прессе под воздействием высокой температуры с заранее подготовленной и нагретой до 100 градусов Цельсия цилиндрической пресс-формой.

В качестве автоматизированного пресса был использован прибор Instron1121, представленный на рисунке 4.



Рис. 4 Лабораторная установка для формирования брикета Instron1121 Fig. 4 Laboratory installation for briquette formation Instron1121

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

Данная установка позволяет прессовать брикеты высокой плотности и с высокой силой сжатия. Помимо этого, можно определить упруго-релаксационные свойства смеси древесных полимерных компонентов и синтетических полимеров, а также, параметры, обуславливающие экструдированность смеси. Возможность изучить влагопластичность древесного компонента и термопластичность синтетических полимеров.

Ход проведения опытов состоял из следующих этапов:

1. Полученная смесь в различных композициях сырья (0/100%, 30/70%, 50/50%, 70/30%, 100/0%) засыпается в подготовленную пресс-форму;
2. Формирование брикета производится на установке Instron1121 под давлением 26 МПа до установления стабилизации прямой на графике прибора;
3. В процессе прессования на установке Instron1121 производился замер температуры пресс-формы с помощью термопары;
4. Извлечение пресс-формы с установки Instron1121 и удаление готового брикета;
5. Замер конструктивных параметров брикета (диаметр и высота) для дальнейшего определения плотности полученного брикета до его полной релаксации и после (с промежутком в 3 дня);
6. Анализ влияния температуры и влажности на упруго-релаксационные свойства брикета, которые связаны с переходом из одного релаксационного состояние в другое.

Зольность определяется по результатам технического анализа топлива путём прокаливании навески топлива ($m_t = 2$ грамм) в муфельной печи при температуре 820 °С в течение 25 мин.

Определение теплотворной способности топлива производится при помощи специальной калориметрической установки, состоящей из калориметра и калориметрической бомбы, которые представлены на рисунке 5.



Рис. 5 Лабораторная калориметрическая установка Fig. 5 Laboratory calorimetric setup

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

В заключительный этап проведения исследования входили теплотехнические расчеты, которые включали в себя: материальный процесс горения топлива, тепловой баланс выбранной энергетической установки, тепловой расчет, аэродинамический расчет, расчет вредных выбросов в атмосферу

Для дальнейшего эффективного сжигания полученного комбинированного брикета в необходимо выбрать оптимальную энергоустановку, позволяющую использовать данный вид топлива с максимальной экологической, энергетической и экономической эффективностью. В данном случае был выбран котлоагрегат БКЗ 210-140Ф, установленный на Кировской ТЭЦ-4 в Санкт-Петербурге в Кировском районе с низкотемпературной вихревой топкой Померанцева [16]. Котел БКЗ-210-140Ф имеет следующие расчетные параметры: паропроизводительность $D = 210$ т/ч; давление перегретого пара $P_{\text{пг}} = 13,8$ МПа; температура перегретого пара $t_{\text{пг}} = 570$ °С. Данный котлоагрегат представлен на рисунке 6.

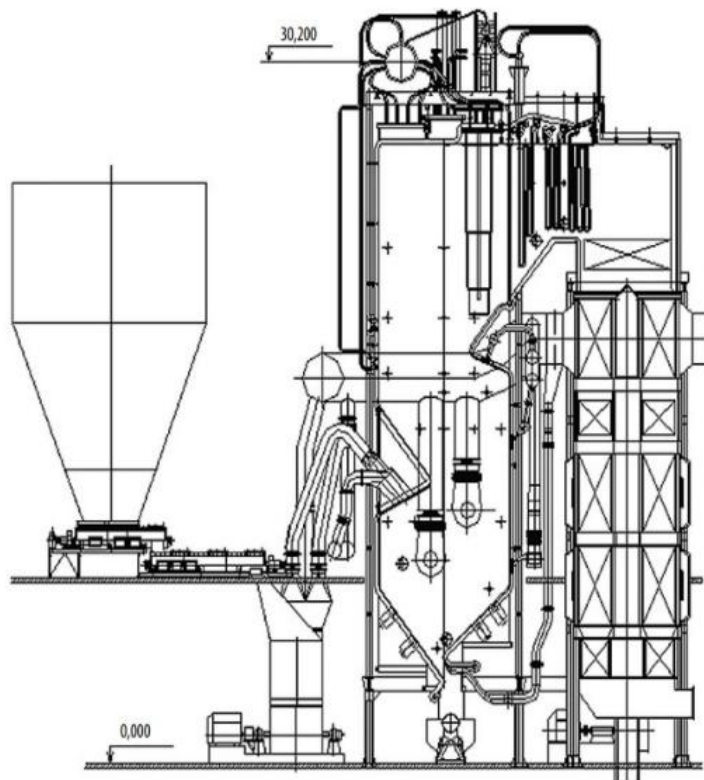


Рис. 6 Котел БКЗ-210-140Ф с низкотемпературной вихревой топкой
 Fig. 6 Boiler BKZ-210-140F with low-temperature swirl furnace
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Способ низкотемпературного вихревого сжигания и топочное устройство было разработано советским ученым-теплоэнергетиком В.В.Померанцевым [16].

В основу данной технологии заложен принцип организации низкотемпературного сжигания грубодисперсного твердого топлива в условиях многократной циркуляции частиц в камерной топке [16-17].

В низкотемпературной вихревой топке организованы две зоны горения: зона активного горения и зона догорания. В отличие от традиционной технологии пылеугольного сжигания [17], где основная часть топлива (до 95 %) сгорает в первой зоне, которая занимает небольшой объем топочной камеры, в вихревой топке вовлечен значительно больший объем топочного пространства. Это приводит к снижению максимальной температуры в вихревой топке (примерно на $100 \div 300$ °С), и за счет активной аэродинамики выравнивается уровень температуры в объеме вихревой зоны (рис.7). Как следствие и название – низкотемпературный вихрь [17].

При этом горящий поток поднимается из холодной воронки вдоль фронтального экрана и зажигает факел непосредственно у корня. За счет такой аэродинамики повышается надежность воспламенения и устойчивость топочного процесса, расширяется диапазон регулирования. Область стока вихря смещена к заднему экрану, в ней при развороте потока происходит эффективная сепарация, способствующая многократной циркуляции топлива внутри топки.

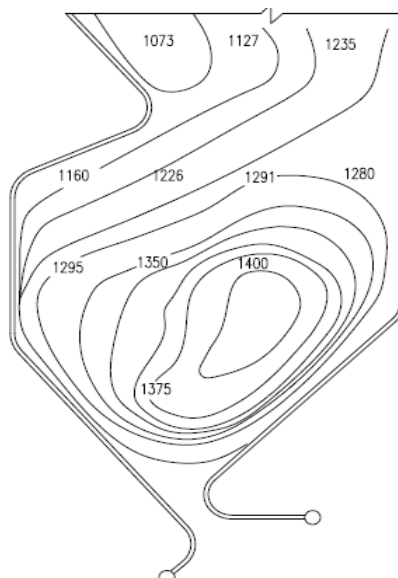


Рис. 7 Температурные поля в топке котла при низкотемпературном сжигании

Fig. 7 Temperature fields in the boiler furnace at low-temperature combustion

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

Пониженный уровень температуры, ввод окислителя ступенчато, многократная циркуляция частиц топлива и углубление состава золы в общей сложности обеспечивают улучшенные показатели низкотемпературных вихревых топок по вредным выбросам: оксидам азота и серы, а также улучшают эффективность работы золоулавливающего оборудования котлоагрегата [17].

Важным достоинством НТВ сжигания является невысокая чувствительность к колебаниям характеристик топлива, которая унифицирует топку по топливу и делает возможным сжигание в одном агрегате различных видов твердого топлива.

НТВ технология сжигания прошла апробацию на широкой гамме твердых топлив, таких как бурые и каменные угли, торф, горючие сланцы, отходы деревообработки и микробиологического производства.

Достоинства низкотемпературных вихревых топок позволяют:

- упростить систему подготовки топлива, увеличить её производительность, обеспечить взрывобезопасность, снизить затраты на подготовку топлива к сжиганию, увеличить срок службы размольного оборудования;
- стабилизировать воспламенение и горение и отказаться от "подсветки" факела газом или мазутом даже при сжигании низкосортных топлив;
- обеспечить устойчивый процесс горения вне зависимости от колебаний нагрузки котла и технических характеристик топлива, что унифицирует топку по топливу;
- повысить коэффициент тепловой эффективности топки, что дает возможность увеличить паропроизводительность котла на 15...20 %;
- исключить шлакование и загрязнение топочных и конвективных поверхностей нагрева;
- обеспечить снижение выбросов оксидов азота NO_x на 30...50 %;
- обеспечить снижение выбросов оксидов серы SO_x на 20...40 % за счет их связывания с основными оксидами золы (CaO и MgO) при благоприятных внутритопочных условиях;
- обеспечить более глубокое связывание оксидов серы за счет ввода в вихревую топку CaO -содержащих добавок.

Результаты (Results)

Результаты первого этапа подготовки сырья – измельчение исходного сырья, показывает ситовый анализ с помощью сит с ячейками различных размеров. Материал пропускается через вертикально установленные друг под другом сита с размерами ячеек: R5000, R2000, R1000, R500. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Результаты проведения ситового анализа отходов ламинированной бумаги
Results of sieve analysis of laminated paper waste

Размер ячейки	Остаток на сите, %	Масса остатка на сите, г
R5000	6,5	1,3
R2000	7,5	1,5
R1000	39	7,8
R500	41	8,2
Остаток на поддоне	6	1,2
Сумма	100	20

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

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что размер большей части полученных частиц ламинированной бумаги, находится в пределах от 1000 до 500 мкм. Размер фракций древесной муки находится в пределах 250 – 500 мкм, результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Результаты проведения ситового анализа древесной муки лиственницы
Results of sieve analysis of larch wood flour

Размер ячейки	Остаток на сите, %	Масса остатка на сите, г
R1000	0	0
R500	31,5	5,2
R250	41	8,2
R100	26	6,3
Остаток на поддоне	1,5	0,29
Сумма	100	20

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

Различный размер фракций древесной муки и отходов ламинированной бумаги – не является негативным фактором для проведения эксперимента, наоборот, исходя из литературных данных, различные размеры композиционных материалов, в том числе и различные длины волокон, способствуют улучшению прочностных свойств получаемых композитов.

Дальнейшим этапом эксперимента является пропарка сырья в различных композициях. Смесь подвергается воздействию насыщенного пара в течение определенного временного промежутка. Экспериментальным путем была установлена зависимость повышения влажности смеси от времени пропарки, данные приведены в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Зависимость изменения влажности от времени пропарки сырья
Dependence of moisture content change on raw material steaming time

№	Время пропаривания, с	Влажность, %
1	10	5,1
2	15	7,3
3	20	10,8
4	30	12,6

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

В качестве оптимальной влажности для формирования брикета – была выбрана влажность со значением 7,3 %. При данной влажности полученный образец имеет гладкую форму, высокую прочность и плотность.

После проведения эксперимента по определению плотности, прочности и коэффициента сжатия комбинированных брикетов с различными композициями сырья при заданных параметрах, были получены следующие результаты, приведенные в таблице 4.

Исходные данные:

$W = 7,3\%$ - влажность сырья (древесные отходы, отходы ламинированной бумаги);

$t_{cp} = 80 \pm 2^\circ\text{C}$ – средняя температура при формировании брикета;

$P = 26\text{ МПа}$ – давление в процессе прессования;

$v = 100\text{ мм/мин}$ – скорость ленты прибора Instron1121;

$m = 2\text{ грамма}$ – масса исходного сырья для формирования брикета;

Прочность на сжатие измерялась с давлением на поперечное направление брикета.

Таблица 4

Table 4

Результаты эксперимента по определению плотности и прочности брикетов
Experimental results on determination of density and strength of briquettes

Композиция сырья, %	Среднее значение влажности полученного брикета после релаксации $W, \%$	Высота брикета после релаксации, мм	Диаметр брикета после релаксации, мм	Среднее значение плотности брикета после релаксации и $\rho_{cp}, \text{кг/м}^3$	Коэффициент сжатия $k_{сж}$	Прочность на сжатие $\sigma_{сж}, \text{МПа}$
0(лам. бум.) /100(древесина)	5,5	12,8	14,5	948	3,6	2
30(лам. бум.) /70(древесина)	4,4	11,8	14,3	1010	-	4
50(лам. бум.) /50(древесина)	3,7	11,5	14,2	1036	2,6	4,5
70(лам. бум.) /30(древесина)	3	11,4	14,3	1048	-	2,5
100(лам. бум.) /0(древесина)	2,2	10,4	14,1	1063	1,9	2

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

В результате проведения экспериментов были выявлены некоторые особенности поведения материалов при их различных композициях и под воздействием таких параметров как влажность и температура, прежде всего – изменение релаксационных состояний [18-19]. Была установлена возможность реализации, в процессе экструзии, термо-пластичности полимерных компонентов древесины и термопластичности синтетических полимеров. При определенных условиях, в процессе формирования брикета, данные композиционные материалы, в частности синтетические полимеры, входящие в состав отходов ламинированной бумаги, переходят из стеклообразного релаксационного состояния в высокоэластическое и, в последствии, возвращаются в исходное стеклообразное состояние через определенный промежуток времени, достигнув температуры стеклования. Этот фактор влечет за собой повышенную плотность готового продукта. В то же время, достаточный процент влажности, за счет гидрофильности древесных компонентов, позволяет брикету сохранять свою форму. Именно по этой причине, решение об использовании отходов ламинированной бумаги, в качестве дополнительного к древесине композиционного материала, является оправданным.

Рассматривая различные варианты значений влажности и температур, в процессе проведения экспериментов, была выявлена оптимальная композиция смеси – 50/50%, при которой полученный брикет способен держать форму и иметь статичные габаритные размеры, не уступая в плотности и, тем более, прочности остальным опытным образцам.

От соотношения отходов производства ламинированной бумаги и древесной муки зависит также и теплотворная способность топлива, что является наиболее важным, с энергетической точки зрения, показателем топлива. Также, не маловажна и экологическая составляющая, т.к. в отходах ламинированной бумаги присутствуют синтетические полимеры, которые влияют на состояние окружающей среды в процессе дальнейшего сжигания. Помимо этого, при термической обработке отходов, содержащих синтетические полимеры – возможны усиленные загрязнения поверхностей нагрева используемого энергетического оборудования из-за плавления полиэтилена. По этой причине

использования слишком большой концентрации отходов данного вида – может крайне негативно отразиться на функционировании оборудования в целом.

В результате была получена и определена оптимальная, по всем параметрам, композиция топливного брикета - 50/50%. В дальнейшем необходимо определить зольность, а также, низшую теплоту сгорания в калориметрической установке.

Состав полученного топливного брикета в композиции 50/50%, соотношений исходного сырья, представлен в таблице 5.

Таблица 5

Table 5

Элементный состав полученного топливного брикета с композицией сырья 50/50%
Elemental composition of the obtained fuel briquette with raw material composition 50/50%

№	Углерод С, %	Водород Н, %	Азот N, %	Кислород О, %	Зольность А, %	Влажность W, %
Комбинированный брикет 50/50 %	50	6,6	0,5	39	0,2	3,7

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

Теплотворная способность топливного брикета в соотношении отходов ламинированной бумаги и древесной муки опилок лиственницы в соотношении 50/50%, по результатам проведенных опытов, представлена в таблице 6.

Таблица 6

Table 6

Теплотворная способность комбинированного топливного брикета 50/50%
Calorific value of combined fuel briquette 50/50%

№	Масса проволки. кг * 10 ⁶	Масса топлива, Кг * 10 ⁵	Темп.нач., °С	Темп.кон., °С	Q ^a _б , КДж/кг	Q ^r _с , КДж/кг	Q ^r _и , КДж/кг
1	53	91	2,5	3,9	25189	21564	19499
2	45	126	3,8	5,1	25796	21832	20157
3	50	116	0,4	1,9	24657	20114	17970
4	40	87	1,25	2,7	23115	21488	19803
5	46	61	2,1	3,2	24485	20322	18001
6	45	95	0,3	1,5	23208	20962	18888
7	47	52	0,4	1,45	23362	21884	19109
8	44	88	1,1	2,3	24777	21367	18857
9	53	76	2,0	2,9	23576	20602	18233
10	43	98	2,65	4,1	24747	21304	19099
11	41	78	3,25	4,15	23104	21897	19439

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

Закключение (Conclusions)

1. В рамках данного исследования были проведены теоретические и экспериментальные исследования, показывающие влияние изменения релаксационных состояний композиционных материалов, при определенных условиях, на физико-химические параметры полученного комбинированного топливного брикета. Также, исследовано взаимодействие термопластичности синтетических полимеров и влагопластичности древесных полимерных компонентов.

2. Данное исследование нацелено на переработку отходов целлюлозно-бумажной промышленности, содержащих синтетические полимеры, в топливный комбинированный брикет, состоящий из твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, с последующим сжиганием в котельной установке с низкотемпературной вихревой топкой. Инновационная технология переработки древесных отходов и отходов упаковочной ламинированной бумаги позволит снизить до минимума вред для экологической составляющей и повысить максимальную энергетическую и экономическую эффективность.

3. Использование полученного нового топлива и технологии его производства, и последующего сжигания в НТВ-топке, даст возможность снизить нагрузку на полигоны с ныне не утилизируемыми отходами, использовать полученную энергию топлива на собственные нужды, упрощает очистку дымовых газов благодаря использованию технологии низкотемпературного вихревого сжигания (низкие показатели концентрации

окислов азота из-за низких температур в зоне активного горения и ступенчатого сжигания, и отсутствие серы).

4. Полученный комбинированный топливный брикет обладает высоким, для своей компоновки, показателем теплотворной способности топлива, равным 19 МДж/кг, что, несомненно, позволяет использовать его в промышленных и бытовых целях с высокой энергетической эффективностью. Также, данное топливо является абсолютно безопасным с точки зрения выбросов дымовых газов в атмосферу при его сжигании, т.к., входящие в его состав синтетические полимеры, не содержат хлора, что означает отсутствие возможности образования хлористых диоксинов [20], которые являются главной причиной невозможности утилизации пластиковых отходов. Полученный комбинированный брикет обладает относительно высокой плотностью – 1036 кг/м³ и является прочным композитом – 4,5 МПа на поперечное сжатие.

5. Проведенное исследование, полученные экспериментальные данные и образцы, целесообразно использовать в качестве основополагающих для внедрения данной технологии в производство. Изложенный в данной статье материал является крайне актуальным на сегодняшний день для Российской Федерации и мира в целом. Перспективы развития описанной инновационной технологии переработки и утилизации отходов крайне велики, поэтому целесообразно развивать её и дальше, не ограничиваясь лишь отходами производства ламинированной бумаги. Это послужит большим шагом к реализации поставленных правительством целей и задач в области композиционных материалов, экологии и энергетики.

Литература

1. Умнов В.А., Коробова О.С., Скрыбина А.А. Углеродный след как индикатор воздействия экономики на климатическую систему // Вестник РГГУ. Серия «Экономика. Управление. Право». 2020. № 2. С. 85–93. DOI: 10.28995/2073-6304-2020-2-85-93.
2. 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.
3. 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).
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Hansen E., Panwar R., Vlosky R. *The Global Forest Sector: Changes, Practices and Prospects* // NY: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2017. P. 462.
9. *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.
10. Ежегодный обзор рынка лесных товаров, 2018–2019 годы: Женева: ЕЭК ООН, 2020- 173с. ISBN 978-92-1-004516.
11. *Forest Products Annual Market Review 2023-2024*, UNECE, 53p. ISBN 978-92-1-003184-4.
12. 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.

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

14. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.

15. Клинов А.С. Разработка технологии и оборудования по утилизации отходов упаковочных материалов/ А.С. Клинов, М.В. Сколово, И.В. Шашков // IX науч. Конф. ТГТУ: тех. докл. -Тамбов: Изд-во Тамб. Гос. Тех. Ун-та, 2004. -С80.

16. 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.

17. 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.

18. Комплексный метод утилизации золошлаковых отходов тепловых электростанций / Э. Р. Зверева, В. П. Плотнокова, Ф. И. Бурганова, Л. О. Зверев // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11, № 2(42). – С. 15-26. – EDN ZTECWP.

19. Исследование реологических свойств композиционных суспензионных топлив / Э. Р. Зверева, Г. Р. Мингалеева, Б. Р. Валиуллин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 143-153. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-143-153. – EDN FPBVXO.

20. Румак В.С., Умнова Н.В. Диоксины и безопасность биосистем: результаты натуральных исследований // Жизнь Земли. 2018. Том 40. № 3. С. 308–320.

Авторы публикации

Рыжиков Владимир Александрович – старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики СПбГУПТД ВШТЭ.

Ерохина Ольга Александровна – старший преподаватель кафедры ТЦКМ, зав. лаб. СПбГУПТД ВШТЭ.

Аким Эдуард Львович – д.т.н., профессор, заведующий кафедры ТЦКМ СПбГУПТД ВШТЭ.

Луканин Павел Владимирович – д.т.н., профессор, первый проректор СПбГУПТД.

References

1. Umnov V.A., Korobova O.S., Skryabina A.A. Carbon footprint as an indicator of the impact of the economy on the climate system // Bulletin of Russian State University of Science and Technology. Series "Economics. Management. Law". 2020. № 2. С. 85-93. DOI: 10.28995/2073-6304-2020-2-85-93.

2. 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.

3. 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).

4. 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. - Т. 23, № 1. - С. 119-130. - DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-119-130. - EDN DRPGTC.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

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

9. 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.

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

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

12. 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.

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

14. Mikhailin Yu.A. Thermo-stable polymers and polymer materials. SPb.: Profession, 2006. 624 c.

15. Klinkov, A.S. Development of technology and equipment for utilization of packaging materials waste / A.S. Klinkov, M.V. Skolovo, I.V. Shashkov // IX Nau. Conf. TSTU: Tech. docl. - Tambov: Tambov: Izd. University, 2004. -C80.

16. 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. Glavkottloturboprom. Center. scientific-research institute named after I. I. Polzunov. I. I. Polzunov. - Moscow; Leningrad: [Leningrad Branch] Mashgiza, 1948 (L.: tip. "Profintern"). - 74 c.

17. A.A. Trichenko, 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.

18. Integrated method of utilization of ash and slag waste from thermal power plants / E. R. Zvereva, V. P. Plotnikova, F. I. Burganova, L. O. Zverev // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. - 2019. - T. 11, № 2(42). - C. 15-26. - EDN ZTECWP.

19. Investigation of rheological properties of composite suspension fuels / E. R. Zvereva, G. R. Mingaleeva, B. R. Valiullin [et al.] // Izvestia vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya. Problems of power engineering. - 2023. - T. 25, № 1. - C. 143-153. - DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-143-153. - EDN FPBVXO.

20. Rumak V.S., Umnova N.V. Dioxins and the safety of biosystems: results of field studies // Life of the Earth. 2018. Vol. 40. No. 3. C. 308-320.

Authors of the publication

Vladimir A. Ryzhikov - Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy. St. Petersburg, Russia.

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

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

Lukanin Pavel V. - Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.
Higher School of Technology and Energy. St. Petersburg, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника».

Получено **28.10.2024 г.**

Отредактировано **12.11.2024 г.**

Принято **15.11.2024 г.**