

УДК 662.818

Владимир Александрович Рыжиков

СПбГУПТД «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: ryzhikov_vladimir@bk.ru

Ольга Александровна Ерохина

СПбГУПТД «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», старший преподаватель кафедры ТЦКМ, заведующая лабораторией, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: art-stones@bk.ru

Эдуард Львович Аким

СПбГУПТД «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ТЦКМ, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: akim-ed@mail.ru

Павел Владимирович Луканин

СПбГУПТД «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», доктор технических наук, профессор, первый проректор, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: tsutd@rambler.ru

Совместная переработка отходов в комбинированные топливные брикеты, содержащие целлюлозу и синтетические полимеры

Авторское резюме

Состояние вопроса. На сегодняшний день в России и мире переработка промышленных отходов является очень актуальной задачей, решение которой позволит осуществить переход к низкоуглеродной циркулярной биоэкономике и снизить углеродный след от антропогенного воздействия. Целью исследования является разработка технологии переработки и утилизации отходов целлюлозно-бумажной промышленности, содержащих синтетические полимеры, путем их совместного использования в виде топливных комбинированных брикетов второго поколения, состоящих из твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, с последующей утилизацией в котельной установке с низкотемпературной вихревой топкой в целях снижения до минимума вреда для экологической составляющей окружающей среды и повышения максимальной энергетической и экономической эффективности промышленных предприятий.

Материалы и методы. Для реализации поставленной цели использованы следующие методы экспериментального исследования: изучение свойств термопластичности синтетических полимеров и влагопластичности полимерных компонентов древесины в процессе формирования брикета; определение эмпирическим путем оптимальной композиции комбинированного брикета и свойств полученного брикета с использованием муфельной печи и калориметрической установки.

Результаты. Представлены результаты проведенных исследований, в частности полученные значения плотности, прочности и теплоты сгорания изготовленного брикета при различных композициях исходного сырья. Определена оптимальная композиция сырья в топливном брикете как соотношение 50 % твердых древесных отходов и 50 % отходов производства ламинированной бумаги. Рассчитана итоговая плотность (составила 1036 кг/м³), среднее значение низшей теплоты сгорания топлива (19 МДж/кг), а также прочность на сжатие 4,5 МПа при давлении на поперечное сечение брикета.

Выводы. Полученные в ходе проведения работы топливные брикеты имеют высокие показатели по плотности, прочности и теплоте сгорания топлива. Инновационная технология переработки древесных отходов и отходов упаковочной ламинированной бумаги позволит снизить до минимума вред для экологической составляющей окружающей среды и повысить максимальную энергетическую и экономическую эффективность промышленных предприятий. Использование полученного топлива и технологии его производства позволит снизить нагрузку на полигоны с до сих пор не утилизируемыми отходами и использовать полученную энергию топлива на собственные нужды.

Ключевые слова: биотопливо, отходы деревообработки, целлюлозно-бумажные отходы, топливные брикеты, синтетические полимеры, термопластичность, влагопластичность, углеродная нейтральность, чистые технологии, биоэкономика

Vladimir Aleksandrovich Ryzhikov

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Senior Lecturer of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, St. Petersburg, e-mail: ryzhikov_vladimir@bk.ru

Olga Aleksandrovna Erokhina

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Senior Lecturer of TCCM Department, Head of Laboratory, Russia, St. Petersburg, e-mail: art-stones@bk.ru

Eduard Lvovich Akim

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Head of TCCM Department, Russia, St. Petersburg, e-mail: akim-ed@mail.ru

Pavel Vladimirovich Lukanin

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, First Vice-Rector, Russia, St. Petersburg, e-mail: tsutd@rambler.ru

Co-processing of waste into combined fuel briquettes containing cellulose and synthetic polymers

Abstract

Background. Today, in Russia and globally, recycling of industrial waste is an extremely urgent task, the solution of which will enable the transition to a low-carbon circular bioeconomy and reduce the carbon footprint of anthropogenic impact. The goal of the research is to develop a technology for processing and utilization of pulp and paper industry waste containing synthetic polymers. It is carried out by their co-utilization 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. The aim is to minimize harm for the ecological environment and increase the maximum energy and economic efficiency of industrial enterprises.

Material and methods. To achieve the stated goal, the following research methods have been used: study of thermoplasticity of synthetic polymers and moisture plasticity of polymeric components of wood in the process of briquette formation, empirical determination of the optimal composition of combined briquette and properties of the obtained briquette using muffle furnace and calorimetric unit.

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. In case of the optimally chosen composition of raw materials in the fuel briquette, which is defined as the ratio of 50 % of solid wood waste and 50 % of laminated paper production waste, the final density is 1036 kg/m³, the average value of the lowest heat of combustion of fuel is 19 MJ/kg. Also, the compressive strength of 4,5 MPa has been determined under pressure on the cross-section of the briquette.

Conclusions. The fuel briquettes obtained during the research have high indicators of density, strength and heat of combustion of fuel. The innovative technology of processing wood waste and waste packaging laminated paper will minimize harm for the environment and increase the maximum energy and economic efficiency of industrial enterprises. 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.

Key words: biofuels, industrial wood waste, pulp and paper waste, fuel briquettes, synthetic polymers, thermoplasticity, moisture plasticity, carbon neutrality, clean technologies, bioeconomy

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.030-038

Введение. 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 [1–3]. Процесс минимизации техногенного влияния на окружающую среду и переход на чистые технологии стал уже не трендом, а неизбежной реальностью [4, 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 соответствии с ним, в ближайшие десятилетия страна будет двигаться в «зеленом» направлении. В числе главных целей станет создание устойчивой системы обращения с твердыми коммунальными отходами, снижение вдвое вредных производственных 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), чаще всего их 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 для получения полезной энергии или топлива [5, 6].

Объем потребления бумаги и картона в мире составляет свыше 430 млн тонн, а объем потребления крупнотоннажных синтетических полимеров – 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 нефти может быть более 10 %, хотя обычно этот показатель не превышает 6 %). 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 [8–10].

Целью исследования является разработка технологии переработки и утилизации отходов целлюлозно-бумажной промышленности, содержащих синтетические полимеры, путем их совместного использования в виде топливных комбинированных брикетов второго поколения, состоящих из твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, с последующей утилизацией в котельной установке с низкотемпературной вихревой топкой [11, 12].

Научная значимость исследования заключается в том, что впервые показана возможность создания топливных брикетов путем совместной переработки твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, содержащих синтетические полимеры. Установлена возможность реализации в процессе экструзии свойств термовлагопластичности полимерных компонентов древесины и термопластичности синтетических полимеров.

В связи с неблагоприятной экологической обстановкой в мире, в частности загрязнением планеты отходами производств и вредными выбросами в атмосферу оксидов азота, серы и диоксида углерода, данное исследование и разработка технологии переработки отходов имеют высокую практическую значимость для предприятий деревообрабатывающей и упаковочной промышленности.

Материалы и методы. 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 °С 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 воздей-

ствием 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 экструдруемость смеси;

- определение конечной влажности и зольности рабочей массы топлива;

- определение низшей теплоты сгорания топлива с помощью лабораторной установки, состоящей из калориметрической бомбы и калориметра;

- проведение теплотехнических расчетов в целях определения энергетической и экологической эффективности полученного топлива.

Перед началом проведения исследования было необходимо подготовить исходное сырье, включающее древесную муку опилок лиственницы и отходы производства ламинированной бумаги (рис. 1).



Рис. 1. Отходы производства упаковочной ламинированной бумаги

На первом этапе при подготовке исходного сырья было осуществлено измельчение материала с помощью лабораторной дисковой мельницы (рис. 2).



Рис. 2. Лабораторная дисковая мельница

Далее был проведен ситовый анализ полученных измельченных отходов. Для корректного определения гранулометрического состава топлива использовалось 20 грамм полученного материала. Данный материал пропущен через вертикально установленные друг под другом сита с размерами ячеек R5000, R2000, R1000, R500.

На следующем шаге подготовки сырья формировались 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 (рис. 3).



Рис. 3. Влагомер ANDMF-50

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

Дальнейшим этапом эксперимента стала пропарка сырья в различных композициях. Смесь подвергалась 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 °С цилиндрической пресс-формой.

В качестве автоматизированного пресса был использован прибор Instron1121 (рис. 4).

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. Таким образом, возможно изучить влагопластичность древесного компонента и термопластичность синтетических полимеров.



Рис. 4. Лабораторная установка Instron1121 для формирования брикета

Ход проведения опытов состоял из следующих этапов:

1. Полученная смесь в различных композициях сырья (0/100 %, 30/70 %, 50/50 %, 70/30 %, 100/0 %) засыпалась в подготовленную пресс-форму.

2. На установке Instron1121 производилось формирование брикета под давлением 26 МПа до установления стабилизации прямой на графике прибора.

3. С помощью термопары осуществлялся замер температуры пресс-формы в процессе прессования на установке Instron1121.

4. Производилось извлечение готового брикета из пресс-формы.

5. Измерялись конструктивные параметры брикета (диаметр и высота) для дальнейшего определения плотности полученного брикета до его полной релаксации и после (с промежутком в 3 дня).

6. Проводился анализ влияния температуры и влажности на упруго-релаксационные свойства брикета, которые связаны с переходом из одного релаксационного состояния в другое.

Зольность определялась по результатам технического анализа топлива путем прокалывания навески топлива ($m_T = 2$ грамм) в муфельной печи при температуре 820 °С в течение 25 мин.

Определение теплоты сгорания топлива производилось при помощи специальной калориметрической установки, состоящей из калориметра и калориметрической бомбы (рис. 5).

В заключительный этап проведения исследования входили теплотехнические расчеты, которые включали в себя: расчет материального

процесса горения топлива; составление теплового баланса выбранной энергетической установки; тепловой расчет; аэродинамический расчет; расчет вредных выбросов в атмосферу.



Рис. 5. Лабораторная калориметрическая установка

Для дальнейшего эффективного сжигания полученного комбинированного брикета необходимо было выбрать оптимальную энергоустановку, позволяющую использовать данный вид топлива с максимальной экологической, энергетической и экономической эффективностью. В данном случае был выбран котлоагрегат БКЗ 210-140Ф с низкотемпературной вихревой топкой Померанцева [11], установленный на Кировской ТЭЦ-4 в Санкт-Петербурге. Котел БКЗ-210-140Ф имеет следующие расчетные параметры: паропроизводительность $D = 210$ т/ч; давление перегретого пара $P_{пп} = 13,8$ МПа; температура перегретого пара $t_{пп} = 570$ °С (рис. 6).

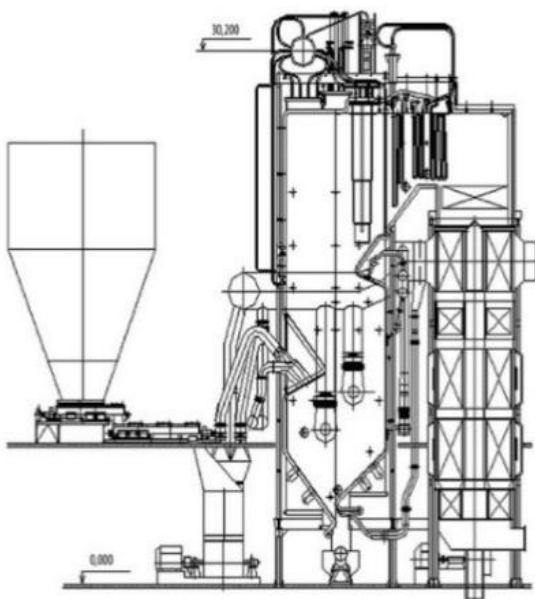


Рис. 6. Котел БКЗ-210-140Ф с низкотемпературной вихревой топкой

Способ низкотемпературного вихревого сжигания и топочное устройство были разработаны советским ученым-теплоэнергетиком В.В. Померанцевым [11].

В основу данной технологии заложен принцип организации низкотемпературного сжигания грубоизмельченного твердого топлива в условиях многократной циркуляции частиц в камерной топке [11, 12].

В низкотемпературной вихревой топке организованы две зоны горения: зона активного горения и зона догорания. В отличие от традиционной технологии пылеугольного сжигания, 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 100–300 °С), и за счет активной аэродинамики выравнивается уровень температуры в объеме вихревой зоны. Как следствие, и название – низкотемпературный вихрь [12].

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.

Пониженный уровень температуры, ступенчатый ввод окислителя, многократная циркуляция частиц топлива и углубление состава золы в общей сложности обеспечивают улучшенные показатели низкотемпературных вихревых топок по вредным выбросам оксидов азота и серы, а также улучшают эффективность работы золоулавливающего оборудования котлоагрегата [12].

Важным достоинством низкотемпературного вихревого сжигания (НТВ) 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.

Результаты исследования. Результаты эксперимента представлены в табл. 1, 2.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что размер большей части полученных частиц ламинированной бумаги находился в пределах от 1000 до 500 мкм, размер фракций древесной муки находился в пределах 250–500 мкм.

Таблица 1. Результаты проведения ситового анализа отходов ламинированной бумаги

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

Таблица 2. Результаты проведения ситового анализа древесной муки лиственницы

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

Различный размер фракций древесной муки и отходов ламинированной бумаги не являлся 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.

На следующем этапе эксперимента – пропарке сырья в различных композициях – экспериментальным путем была установлена зависимость повышения влажности смеси от времени пропарки (табл. 3).

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

После проведения эксперимента по определению плотности, прочности и коэффициента сжатия комбинированных брикетов с различными композициями сырья при температуре

80 градусов и влажности 7,3 % были получены результаты, приведенные в табл. 4.

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. Была установлена возможность реализации в процессе экструзии свойств термовлагодластичности 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, переходили из стеклообразного релаксационного состояния в высокоэластическое и впоследствии возвращались в исходное стеклообразное состояние, через определенный промежуток времени достигнув температуры стеклования.

Таблица 3. Зависимость изменения влажности от времени пропарки сырья

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

Таблица 4. Результаты эксперимента по определению плотности и прочности брикетов

Композиция сырья (ламинированная бумага / древесины), %	Среднее значение влажности полученного брикета после релаксации, %	Высота брикета после релаксации, мм	Диаметр брикета после релаксации, мм	Среднее значение плотности брикета после релаксации, кг/м ³	Коэффициент сжатия	Прочность на сжатие, МПа
0 / 100	5,5	12,8	14,5	948	3,6	2
30 / 70	4,4	11,8	14,3	1010	–	4
50 / 50	3,7	11,5	14,2	1036	2,6	4,5
70 / 30	3	11,4	14,3	1048	–	2,5
100 / 0	2,2	10,4	14,1	1063	1,9	2

Этот фактор влечет за собой повышенную плотность готового продукта. В то же время достаточный процент влажности в силу гидрофильности древесных компонентов позволял брикету сохранять свою форму. Именно по этой причине решение об использовании отходов ламинированной бумаги в качестве дополнительного к древесине композиционного материала явилось оправданным.

В результате анализа различных вариантов 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 прочности остальным опытным образцам.

От соотношения отходов производства ламинированной бумаги и древесной муки зависела также и низшая теплота сгорания топлива, что является наиболее значимым фактором с энергетической точки зрения. Также немаловажна и экологическая составляющая, так как 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 поверхности нагрева используемого энергетического оборудования из-за плавления полиэтилена. По этой причине использование отходов данного вида в слишком большой концентрации может крайне негативно отразиться на функционировании оборудования в целом.

В результате получена и определена оптимальная по всем параметрам композиция топливного брикета – 50/50 %, для которой была определена зольность и низшая теплота сгорания в калориметрической установке. Со-

став полученного топливного брикета в композиции 50/50 % соотношений исходного сырья представлен в табл. 5.

Теплота сгорания топливного брикета в соотношении отходов ламинированной бумаги и древесной муки опилок лиственницы в соотношении 50/50 %, по результатам проведенных опытов, представлена в табл. 6.

Выводы. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали влияние изменения релаксационных состояний композиционных материалов при определенных условиях на физико-химические параметры полученного комбинированного топливного брикета – термопластичности синтетических полимеров и влагопластичности древесных полимерных компонентов.

Разработанная инновационная технология переработки древесных отходов и отходов упаковочной ламинированной бумаги позволит снизить до минимума экологический ущерб и повысить максимальную энергетическую и экономическую эффективность промышленных предприятий.

Использование полученного нового топлива и технологии его производства и последующего сжигания в НТВ-топке даст возможность снизить нагрузку на полигоны с до сих пор не утилизируемыми отходами, использовать полученную энергию топлива на собственные нужды, упростить очистку дымовых газов благодаря использованию технологии низкотемпературного вихревого сжигания.

Полученный комбинированный топливный брикет обладает высоким для своей компоновки показателем низшей теплоты сгорания топлива, равным 19 МДж/кг, что, несомненно, позволяет использовать его в промышленных и бытовых целях с высокой энергетической эффективностью.

Таблица 5. Элементный состав полученного топливного брикета с композицией сырья 50/50 %

Композиция брикета	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

Таблица 6. Теплота сгорания комбинированного топливного брикета 50/50 %

№ образца	Масса проволоки, кг * 10 ⁶	Масса топлива, кг * 10 ⁵	Температура начальная, °С	Температура конечная, °С	Теплота сгорания по бомбе, кДж/кг	Высшая теплота сгорания, кДж/кг	Низшая теплота сгорания, 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

Также данное топливо является абсолютно безопасным с точки зрения выбросов дымовых газов в атмосферу при его сжигании, так как входящие в его состав синтетические полимеры не содержат хлора, что означает отсутствие возможности образования хлористых диоксинов [13], которые являются главной причиной невозможности утилизации пластиковых отходов. Полученный комбинированный брикет обладает относительно высокой плотностью 1036 кг/м^3 и является прочным композитом, имеющим прочность сжатия $4,5 \text{ МПа}$ на поперечное сечение.

Проведенное исследование, полученные экспериментальные данные и образцы целесообразно использовать в качестве основополагающих для внедрения данной технологии в производство.

Список литературы

1. Умнов В.А., Коробова О.С., Скрыбина А.А. Углеродный след как индикатор воздействия экономики на климатическую систему // Вестник РГГУ. Сер. Экономика. Управление. Право. – 2020. – № 2. – С. 85–93. DOI: 10.28995/2073-6304-2020-2-85-93.
2. Improved yield of carbon fibres from cellulose and kraft lignin / A. Bengtsson, J. Bengtsson, C. Olsson, et al. // *Holzforschung*. – 2018. – Vol. 72. – P. 1007–1016.
3. Вирт А. Дэвид. Глобальное управление в сфере изменения климата. Парижское соглашение: новый компонент климатического режима ООН // Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика. – 2017. – № 12(4). – С. 185–214.
4. Akim E.L., Mandre Yu.G., Pekarets A.A. Changes in the relaxation state of polymeric components of wood during its high-temperature biorefining // *Khimicheskie volokna*. – 2019. – No. 3. – P. 14–18.
5. Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm / Detlef P. van Vuuren, Elke Stehfest, David E.H.J. Gernaat, et al. // *Global Environmental Change*. – 2017. – Vol. 42. – P. 237–250.
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 Междунар. науч.-техн. конф. им. проф. В.И. Комарова, Архангельск, 14–16 сентября 2023 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – Архангельск, 2023. – С. 65–69.
7. Упруго-релаксационные свойства древесины лиственных 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. – 82 p.
10. Ежегодный обзор рынка лесных товаров, 2018–2019 годы. – Женева: ЕЭК ООН, 2020. – 173 с.
11. Померанцев В.В. Топки скоростного горения для древесного топлива / М-во тяжелого машиностроения СССР; Главкотлотурбопром.; Центр. науч.-исслед. ин-т им. И.И. Ползунова. – М.; Л.: Ленингр. отделение Машгиза, 1948 (Л.: тип. «Профинтерн»). – 74 с.
12. Тринченко А.А., Парамонов А.П. Внедрение низкотемпературного вихревого сжигания для энергетического использования каменных углей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2015. – № 4(231).
13. Румак В.С., Умнова Н.В. Диоксины и опасность биосистем: результаты натурных исследований // Жизнь Земли. – 2018. – Т. 40, № 3. – С. 308–320.

References

1. Umnov, V.A., Korobova, O.S., Skryabina, A.A. Uglernodnyy sled kak indikator vozdeystviya ekonomiki na klimaticheskuyu sistemu [Carbon footprint as an indicator of the impact of the economy on the climate system]. *Vestnik RGGU. Seriya «Ekonomika. Upravlenie. Pravo»*, 2020, no. 2, pp. 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. Improved yield of carbon fibres from cellulose and kraft lignin. *Holzforschung*, 2018, vol. 72, pp. 1007–1016.
3. Virt, A. David. Global'noe upravlenie v sfere izmeneniya klimata Parizhskoe soglasenie: novyy komponent klimaticheskogo rezhima OON [Global governance on climate change Paris Agreement: a new component of the UN climate regime]. *Vestnik mezhdunarodnykh organizatsiy: obrazovanie, nauka, novaya ekonomika*, 2017, no. 12(4), pp. 185–214.
4. Akim, E.L., Mandre, Yu.G., Pekarets, A.A. Changes in the relaxation state of polymeric components of wood during its high-temperature biorefining. *Khimicheskie volokna*, 2019, no. 3, pp. 14–18.
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*, 2017, vol. 42, pp. 237–250.
6. Ryzhikov, V.A., Akim, E.L., Erokhina, O.A., Pekarets, A.A. Sovmestnaya pererabotka otkhodov kartonno-bumazhnoy makulatury, soderzhashchikh tsellyulozu i sinteticheskie polimery, i tverdykh drevesnykh otkhodov, vkhodyashchikh v sostav toplivnogo briketa [Joint processing of waste cardboard and paper waste containing cellulose and synthetic polymers and solid wood waste, which is part of the fuel briquette]. *Materialy*

VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii imeni professora V.I. Komarova «Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov», Arkhangel'sk, 14–16 sentyabrya 2023 g. [Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference named after Professor V.I. Komarov "Problems of mechanics of cellulose and paper materials", Arkhangel'sk, September 14–16, 2023]. Arkhangel'sk, 2023, pp. 65–69.

7. Pekarets, A.A., Erokhina, O.A., Novozhilov, V.V., Mandre, Yu.G., Akim, E.L. Uprugorelaksatsionnye svoystva drevesiny listvennitsy i ikh rol' pri poluchenii drevesnykh i drevesno-ugol'nykh briketov [Elastic-relaxation properties of larch wood and their role in obtaining wood and charcoal briquettes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*, 2020, no. 1(373), pp. 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, 82 p.

10. *Ezhegodnyy obzor rynka lesnykh tovarov, 2018–2019 gody* [Annual Forest Products Market Review, 2018–2019]. Geneva: UNECE, 2020. 173 p.

11. Pomerantsev, V.V. *Topki skorostnogo gorennya dlya drevesnogo topliva* [Furnaces of high-speed combustion for wood fuel]. Moscow; Leningrad: Leningradskoe otdelenie Mashgiza, 1948. 74 c.

12. Trichenko, A.A., Paramonov, A.P. Vnedrenie nizkotemperaturnogo vikhrevogo szhiganiya dlya energeticheskogo ispol'zovaniya kamennykh ugley [Implementation of low-temperature vortex combustion for power utilization of hard coal]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 4(231).

13. Rumak, V.S., Umnova, N.V. Dioksiny i bezopasnost' biosistem: rezul'taty naturnykh issledovaniy [Dioxins and the safety of biosystems: results of field studies]. *Zhizn' Zemli*, 2018, vol. 40, no. 3, pp. 308–320.