

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 662.767:662.693

Татьяна Анатольевна Кулагина

Сибирский федеральный университет, доктор технических наук, заведующая кафедрой техносферной и экологической безопасности, Политехнический институт, Россия, Красноярск, телефон +7(391)206-21-95, e-mail: tak.sfu@gmail.com

Ирина Валерьевна Кириллова

Сибирский федеральный университет, старший преподаватель кафедры техносферной и экологической безопасности, Политехнический институт, Россия, Красноярск, телефон +7(391)206-21-95, e-mail: kirina.24@yandex.ru

Татьяна Алексеевна Соловьева

Дальневосточный федеральный университет, кандидат технических наук, доцент департамента энергетических систем, Политехнический институт, Россия, Владивосток, e-mail: mtasta@mail.ru

Повышение энергоэффективности комбинированных искусственных топлив

Авторское резюме

Состояние вопроса. Использование композиционных видов биотоплива, используемых для получения энергии на основе ископаемого топлива с добавлением отходов, имеющих существенную органическую составляющую, представляет собой своевременное решение задач ресурсосбережения и управления отходами. Важную роль в процессе их брикетирования играет лигнин, выступающий в качестве природного связующего. Исследования показывают, что комбинирование различных видов полуфабрикатов, например древесных опилок с агроотходами, возможно без использования первичных ресурсов и позволяет нивелировать их индивидуальные недостатки и улучшать характеристики конечного продукта.

Материалы и методы. Исследование проведено на основе лабораторного анализа топливных брикетов, состоящих из смеси опилок хвойных пород и органических отходов кролиководства. Биотопливные брикеты формировали методом прессования на экструзионном прессе. Древесную составляющую смеси подвергали первичной сушке, измельчению, термообработке, гомогенизации. Для оценки качества образцов с варьируемым содержанием биомассы от 0 до 40 % проведен комплексный анализ ключевых характеристик: влажности, насыпной плотности, прочности на сжатие, теплотворной способности и зольности. Статистическая обработка данных выполнена с использованием аналитической платформы Loginom Community.

Результаты. Проведен лабораторный анализ ключевых характеристик топливных брикетов из смеси опилок хвойных пород и органических отходов кролиководства. Экспериментально установлено, что содержание биомассы существенно влияет на свойства брикетов: теплотворная способность возрастает с увеличением ее доли до 25–30 %; прочность на сжатие достигает пикового значения при 20 % биомассы, после чего снижается из-за нарушения однородности структуры; зольность последовательно уменьшается с 4,5 % (0 % биомассы) до 1,8 % (40 % биомассы) благодаря низкому содержанию минеральных веществ в органических отходах; влажность сырья и насыпная плотность увеличивается с ростом доли биомассы, положительно влияя на уплотнение. В результате статистического анализа выявлена прямая корреляция между содержанием биомассы, влажностью и теплотворной способностью, а также обратная между содержанием биомассы и зольностью. Наилучший баланс между высокими энергетическими показателями и удовлетворительными прочностными характеристиками достигается в диапазоне 20–25 %.

Выводы. На основании проведенного исследования определено оптимальное содержание биомассы (органических отходов кролиководства) в комбинированном топливном брикете при значительном снижении зольности продукта.

Разработанная рецептура и технология позволяют производить твердое биотопливо с улучшенными эксплуатационными и экологическими свойствами, пригодное и удобное для практического использования.

Ключевые слова: комбинированное топливо, отходы деревообработки, топливный брикет, биомасса, органические отходы, энергетическая ценность, термообработка, прессование брикетов

Tatyana Anatolyevna Kulagina

Siberian Federal University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Head of Technosphere and Environmental Safety Department, Polytechnic Institute, Russia, Krasnoyarsk, telephone +7(391)206-21-95, e-mail: tak.sfu@gmail.com

Irina Valerievna Kirillova

Siberian Federal University, Senior Lecturer of Technosphere and Ecological Safety Department, Polytechnic Institute, Russia, Krasnoyarsk, telephone +7(391)206-21-95, e-mail: kirina.24@yandex.ru

Tatyana Alekseevna Solovyova

Far Eastern Federal University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Energy Systems Department, Polytechnic Institute, Russia, Vladivostok, e-mail: mtasta@mail.ru

Increasing the energy efficiency of combined artificial-processed fuel

Abstract

Background. Composite types of biofuels used to generate energy based on fossil fuels with the addition of waste that has a significant organic component are an important area of research in the context of resource conservation and waste management. Lignin plays an important role in the process of briquetting, acting as a natural binder. Research shows that it is possible to combine different types of semi-finished products, such as sawdust and agricultural waste, without using primary resources, which can help to eliminate their individual drawbacks and improve the characteristics of the final product.

Materials and methods. The study has been conducted on the basis of a laboratory analysis of fuel briquettes that consist of a mixture of coniferous sawdust and organic waste from rabbit farming. The biofuel briquettes have been formed using an extrusion press. The wood component of the mixture has been subjected to primary drying, grinding, heat treatment, and homogenization. A comprehensive analysis of key characteristics, including moisture content, bulk density, compressive strength, calorific value, and ash content, has been conducted to evaluate the quality of samples with varying biomass content ranging from 0 to 40 %. Statistical data processing has been performed using the Loginom Community analytical platform.

Results. A laboratory analysis of the key characteristics of fuel briquettes made from a mixture of coniferous sawdust and organic waste of rabbit farming has been carried out. It has been experimentally established that the content of biomass has a significant effect on the properties of briquettes. The calorific value increases with an increase in the proportion of biomass up to 25–30 %. The compressive strength reaches a peak value at 20 %, after which it decreases due to deformation of the homogeneity of the structure; the ash content decreases consistently from 4,5 % (0 % biomass) to 1,8 % (40 % biomass) due to the low content of minerals in organic waste. The moisture content of the raw material and the bulk density increase with the increase in the proportion of biomass, which has a positive effect on compaction. Statistical analysis has revealed a direct correlation between the biomass content, moisture content, and calorific value, as well as an inverse correlation between the biomass content and ash content. The best balance between high energy performance and satisfactory strength characteristics is achieved in the range of 20–25 %.

Conclusions. Based on the conducted research, the optimal content of biomass (organic waste from rabbit farming) in a combined fuel briquette has been determined in case of a significant reduction of the ash content of the product. The developed formulation and technology allow for the production of solid biofuel with improved operational and environmental properties, which is suitable and convenient for practical use.

Key words: combined fuel, wood processing waste, fuel briquettes, biomass, organic waste, calorific value, heat treatment, briquette pressing

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.005-011

Введение. Разработка рецептур комбинированных твердых биотоплив на основе энергетических отходов является перспективным направлением в решении задач энергосбережения и утилизации ценных органических остатков. Сочетание различных видов сырья позволяет уменьшить влияние их индивидуальных недостатков и делает возможным создание продукта с заданными физико-химическими свойствами. В настоящем исследовании системно исследован технологический процесс производства

топливных брикетов, включающий этапы подготовки, гомогенизации, сушки, прессования. Особое внимание уделено влиянию доли биомассы (кроличьих отходов) при формировании брикета и изменению ключевых характеристик готового продукта: теплотворной способности, зольности, механической прочности и устойчивости к воздействию влаги. Задача возможной переработки низкосортной биомассы и древесных отходов в высокоэнергетическое твердое топливо является актуальной и широко

освещается в научной литературе. Исследования сфокусированы на оптимизации технологических параметров, изучении влияния состава сырья на характеристики конечного продукта, экономической и экологической оценке используемых процессов.

Важную роль в формировании брикета, содержащего отходы лесопиления, играет лигнин. Влияние лигнина как природного связующего подробно описано в [1, 2, 3]. В исследованиях подчеркивается ключевая роль этого компонента, который при нагреве в процессе прессования пластифицируется и скрепляет составные частицы. В опубликованных работах показано, что добавление отходов с низким содержанием лигнина (солома, лузга подсолнечника) в топливную смесь требует корректировки температурно-влажностных режимов или введения дополнительных веществ, обладающих связующими свойствами.

В исследованиях [4, 5] проведен комплексный анализ различных соотношений опилок хвойных пород с отходами производства льна и рапса. Экспериментально доказано, что введение 20–30 % агробиомассы позволяет получить брикет с повышенной удельной теплотой сгорания без потери прочностных характеристик.

Важным является тот факт, что для брикетов, содержащих биомассу, актуальна проблема большой зольности и коррозионной активности дымовых газов. Исследователи [6, 7] акцентируют внимание на высоком содержании щелочных металлов в сельскохозяйственной биомассе. Это может приводить не только к повышению содержания золы и коррозии элементов котлов, но и к спеканию шлака. Решение этой проблемы возможно за счет предварительной промывки сырья, использования добавок-катализаторов или постоянного контроля за дозировкой всех компонентов в смеси.

Методы исследования. В лабораториях Сибирского федерального университета были запланированы и проведены эксперименты по определению оптимального состава брикета на основе полученных результатов исследований с последующим установлением основных характеристик топлива, таких как насыпная плотность исходной смеси, прочность, теплотворная способность, остаточная зольность, а также исследований по определению элементного состава золы, а именно процентного содержания углерода, водорода, кислорода, азота и серы. В качестве сырьевой базы использовались отходы лесопиления (опилки хвойных пород) и органические отходы кролиководческих хозяйств, при этом технологический процесс производства брикета исключал применение синтетических связующих агентов.

Промышленные образцы брикетов были получены на предприятии «Гуй-Жень-И», специализирующемся на изготовлении пеллет и брикетов из опилок.

Методика подготовки сырья к прессованию включает стадийную сушку кроличьего помета до достижения постоянной массы в соответствии с ГОСТ Р 54192-2010 с последующим его измельчением. Древесные отходы предварительно подвергаются термообработке в барабане роторного типа при температуре 400 °С для достижения влажности около 12 %. Гомогенизированная смесь компонентов направляется в экструзионный пресс, где под воздействием высокого давления происходит формирование топливных брикетов [8, 9, 10], имеющих удобную и эстетически современную форму (рис. 1).



Рис. 1. Промышленные образцы топливных брикетов

Для оценки качества полученных образцов с вариативным содержанием биомассы был проведен комплексный анализ их ключевых физико-механических свойств. Влажность исходного сырья, насыпная плотность и компонентный состав, определявшиеся в соответствии со стандартами ГОСТ Р 54192-2010 и ГОСТ 32987-2014, являются основными факторами качества биотоплива. Именно эти характеристики обуславливают эксплуатационную стойкость брикетов к механическим воздействиям (сжатие, удар) и впитыванию влаги в процессе транспортировки и хранения. Этим объясняется проведенная серия экспериментов по оценке прочности на сжатие композиционных образцов. На универсальной машине РГМ-600-А-1 (рис. 2) цилиндрические образцы диаметром и высотой 5 мм подвергались постепенно возрастающей нагрузке на гидравлическом прессе до момента их разрушения. При этом для определения прочности на сжатие образца фиксировали разрушающую нагрузку.



Рис. 2. Универсальная испытательная машина РГМ-600-А-1

Параллельно в лабораторных условиях определяли энергетическую ценность топлива (теплоту сгорания) с использованием калориметрической бомбы (рис. 3).



Рис. 3. Установка IKA C 6000

После обработки экспериментальных данных, анализа полученных характеристик была создана рецептура твердого биотоплива с оптимальным содержанием биомассы.

Результаты исследования. Качественные характеристики брикетов из биомассы определяются составом компонентов, содержанием влаги в исходном сырье, технологией брикетирования и насыпной плотностью брикета.

Влажность смеси для брикетирования образцов определялась по формуле

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где m_1 – вес тигля, г; m_2 – вес образца + вес тигля, г; m_3 – вес образца после сушки + вес тигля, г.

Насыпную плотность брикета рассчитывали путем деления массы брикета на объем по соответствующей методике, кг/м³:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}, \quad (2)$$

где m_1 – масса тигля, кг; m_2 – вес образца, кг; V – объем тигля, м³.

Как известно, определенные таким образом характеристики брикетов отвечают за их устойчивость к сжатию, ударам и воздействию воды при транспортировке и хранении.

Прочность на сжатие определялась как отношение разрушающей нагрузки (усилие пресса) к площади образца, МПа или в кг/см²:

$$\sigma = \frac{P}{S}, \quad (3)$$

где P – разрушающая нагрузка, кН; S – площадь поперечного сечения образца, см².

Полученные результаты исследования образцов приведены в табл. 1.

Для корректной обработки полученных результатов исследований использовалась аналитическая платформа Loginom Community. Графические изображения изменения характерных показателей приведены на рис. 4–6.

На рис. 4 показана зависимость прочностных и теплотворных характеристик от содержания биомассы в брикете. При малом содержании биомассы (до 20 %) происходит уплотнение структуры брикета за счет связующих компонентов биомассы, но при превышении оптимального содержания (25 %) нарушается однородность структуры, частицы биомассы начинают создавать точки напряжения.

Исходя из того, что биомасса имеет более высокую удельную теплоту сгорания по сравнению с исходным материалом, при достижении определенной доли содержания кроличьих отходов (25–30 %) увеличение вклада агроотходов незначительно влияет на энергетическую ценность топливного брикета. Снижение зольности топлива объясняется низким содержанием минеральных веществ в биомассе, поэтому частичное замещение исходного материала отходами кроличьих ферм уменьшает общее содержание неорганических компонентов в комбинированных брикетах.

Таблица 1. Характеристики образцов, использованных для исследований

Разновидность отходов лесопиления	Содержание биомассы, %	Влажность сырья, %	Давление прессования, МПа	Прочность на сжатие брикета, МПа	Насыпная плотность, кг/м ³	Теплотворная способность, МДж/кг	Зольность, %
Хвойные	0	8	20	15,2	397	17,6	4,5
Хвойные	5	8,5	20	15,9	400	17,8	3,2
Хвойные	10	9,5	20	16,4	408	17,8	2,8
Хвойные	15	12	20	16,5	411	18	2,6
Хвойные	20	14	20	17,15	413	18,42	2,1
Хвойные	25	14,3	20	17,1	417	18,51	2,1
Хвойные	30	15,8	20	15,4	422	18,48	2
Хвойные	35	16,1	20	14,5	429	18,46	1,9
Хвойные	40	16,5	20	13,2	431	18,52	1,8

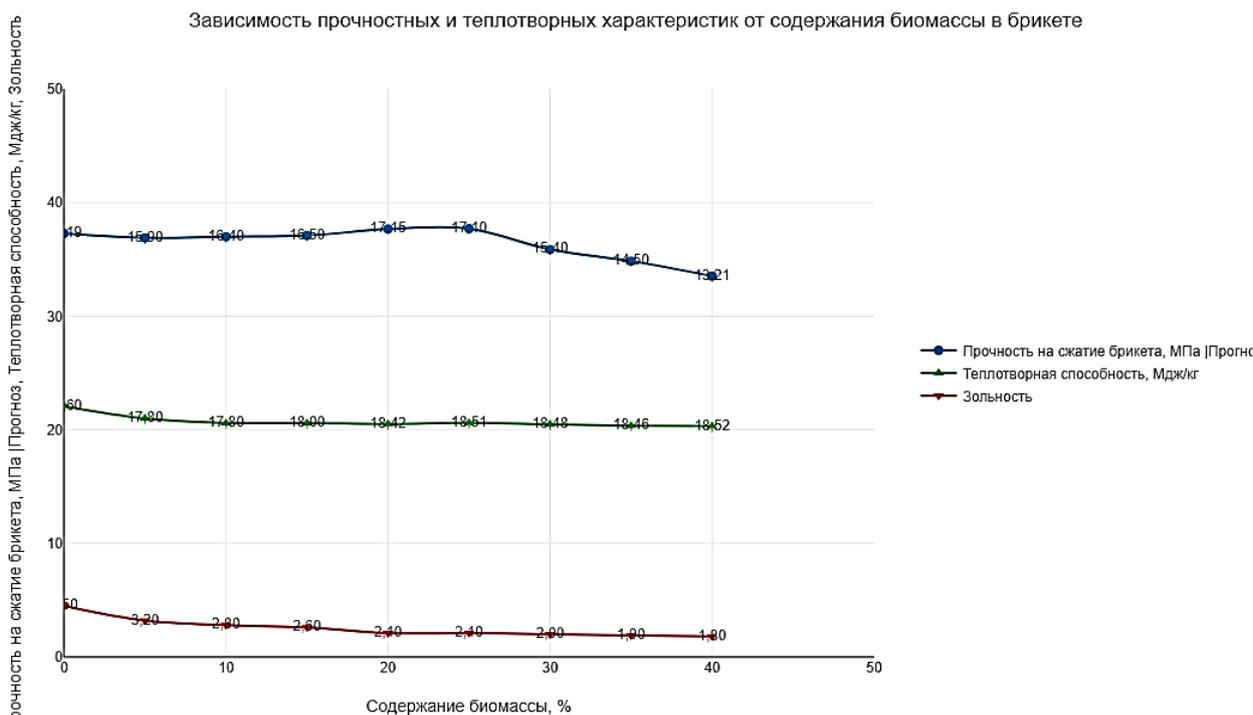


Рис. 4. Зависимость прочностных и теплотворных характеристик от содержания биомассы в брикете

На рис. 5 приведены показатели влажности сырья, участвующего в процессе брикетирования, и их теплотворные характеристики в зависимости от насыпной плотности. Увеличение влажности приводит к лучшей пластификации лигно-целлюлозных компонентов при прессовании. Вода выступает как временное связующее, облегчая уплотнение частиц, поэтому за счет снижения межчастичного трения увеличивается насыпная плотность и, как следствие, более эффективное уплотнение брикета. При достижении

влажности 15 % дальнейший рост плотности замедляется из-за вытеснения воздуха водой и снижения прочности связей, возникших после сушки.

Известно, что энергетическая ценность линейно связана с насыпной плотностью. Уменьшение содержания воздуха приводит к более компактному расположению горючих компонентов. Также стоит отметить, что увеличение плотности брикетов сверх оптимума может привести к ухудшению процесса горения за счет увеличения времени окислительных процессов.

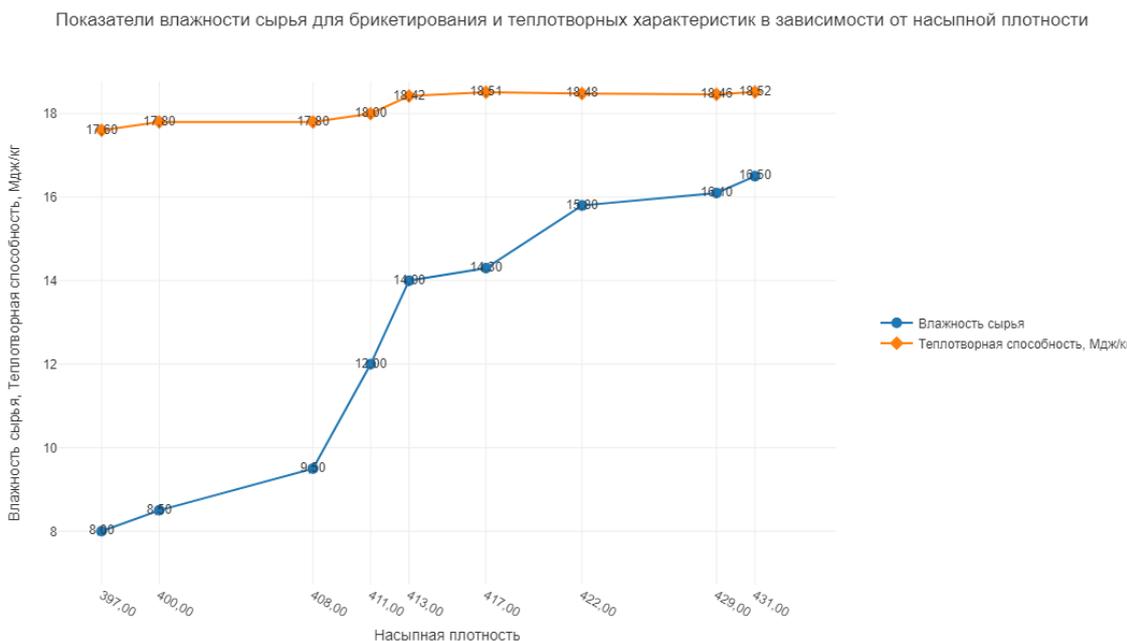


Рис. 5. Показатели влажности сырья для брикетирования и теплотворных характеристик в зависимости от насыпной плотности

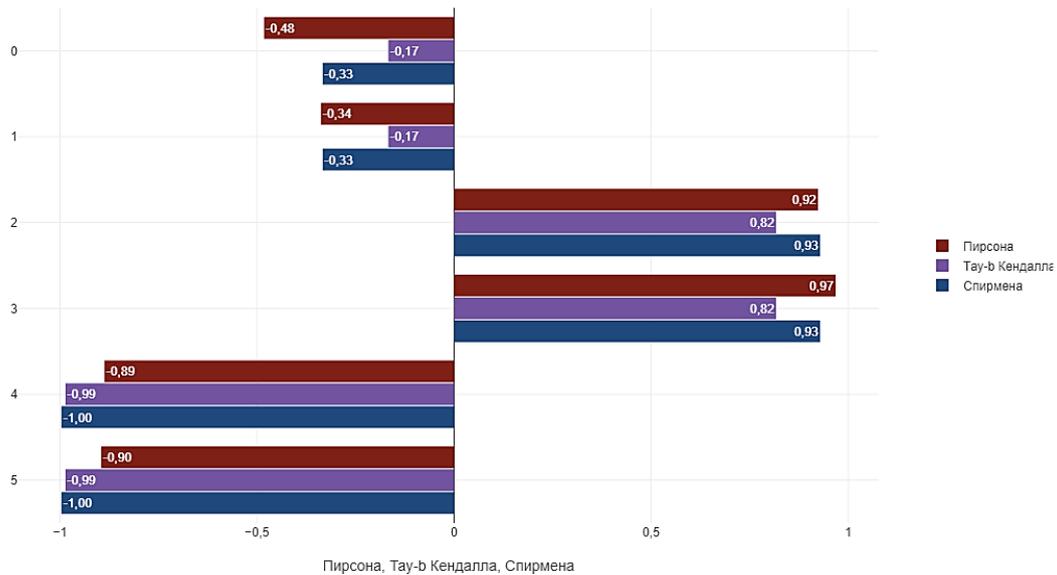


Рис. 6. Сравнение методов оценки корреляционных связей

В табл. 2 приведено сравнение методов оценки корреляционных связей с помощью различных коэффициентов корреляции: коэффициента корреляции Пирсона – статистическая мера, которая показывает силу и направление линейной связи между двумя переменными; коэффи-

циента корреляции Спирмена – непараметрическая мера, которая показывает силу и направление монотонной связи между двумя переменными; коэффициента корреляции Тау-в Кендалла – мера, которая показывает силу и направление монотонной связи на основе согласованности пар наблюдений.

Таблица 2. Полученные коэффициенты корреляции (Пирсона, Тау-в Кендалла, Спирмена)

Показатели		Коэффициенты корреляции		
Факторные (независимые) переменные	Результирующие (зависимые) переменные	Пирсона	Тау-в Кендалла	Спирмена
Влажность сырья, %	Теплотворная способность, Мдж/кг	0,9676	0,8169	0,9288
Содержание биомассы, %	Теплотворная способность, Мдж/кг	0,9235	0,8169	0,9288
Влажность сырья, %	Прочность на сжатие брикета, МПа	-0,3374	-0,1666	-0,3333
Содержание биомассы, %	Прочность на сжатие брикета, МПа	-0,4821	-0,1666	-0,3333
Содержание биомассы, %	Зольность, %	-0,8867	-0,9860	-0,9958
Влажность сырья, %	Зольность, %	-0,8950	-0,9860	-0,9958

Высокие значения коэффициентов указывают на стабильную прямую зависимость всех величин. Увеличение влажности коррелируется с ростом содержания биомассы, которая обладает высокой удельной теплотой сгорания (17–19 МДж/кг). Полученная влажность косвенно указывает на содержание гидрофильных органических компонентов, которые при сгорании дают дополнительную энергию. Значение коэффициента Пирсона $\approx 0,97$ указывает на идеальную линейную зависимость этих характеристик. Значение коэффициента Спирмена $\approx 0,93$ свидетельствует о наличии небольших отклонений от монотонности. Значение коэффициента Кендалла $\approx 0,82$ подтверждает общую направленность, но с меньшей чувствительностью.

Графическое представление методов оценки корреляционных связей показано на рис. 6.

Выводы. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Оптимальное содержание биомассы в составе комбинированного топливного брикета на основе хвойных опилок и органических отходов кролиководства составляет 20–25 %. В этом диапазоне достигается наилучшее сочетание прочностных и энергетических характеристик.

2. Теплотворная способность брикетов возрастает с увеличением доли биомассы до 25 %, достигая значений 18,51 МДж/кг, что объясняется высокой удельной теплотой сгорания биомассы.

Прочность на сжатие достигает максимума (17,15 МПа) при 20 % содержания биомассы, после чего начинает снижаться из-за нарушения однородности структуры и возникновения точек напряжения.

Зольность брикетов снижается с ростом доли биомассы (до 1,8 % при 40 %), что связано с низким содержанием минеральных веществ в органических отходах.

Влажность сырья оказывает значительное влияние на пластификацию лигноцеллюлозных компонентов и уплотнение брикета. Однако при влажности свыше 15–18 % рост плотности замедляется, а прочность снижается.

3. Статистический анализ подтверждает прямую зависимость между процентным содержанием биомассы, влажностью сырья и теплотворной способностью, а также обратную – между содержанием биомассы и зольностью.

Практическая значимость исследования заключается в разработке рецептуры производства твердого биотоплива с улучшенными энергетическими и экологическими показателями, пригодного для использования в условиях реального производства и для частных домовладений.

Список литературы

1. Пекарец А.А., Аким Э.Л. Создание технологии получения топливных и угольных брикетов из опилок древесины лиственницы // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 23–24 мая 2018 г. – СПб., 2018. – Т. 2. – С. 117–119.

2. Утилизация отходов деревообрабатывающих предприятий Республики Саха (Якутия) в топливные брикеты / Л.А. Николаева, С.Н. Попов, О.Н. Буренина, Т.М. Соловьев // Интернет журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 45–51.

3. Гнидан Е.В. Лигнин древесины осины: особенности состава, строения, фракционирования и конверсии // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 4-2 (118). – С. 162–166.

4. Multi-purpose production with valorization of wood vinegar and briquette fuels from wood sawdust by hydrothermal process / C. Wang, S. Zhang, S. Wu et al. // Fuel. – 2020. – Vol. 282. – P. 3–9.

5. Эколого-технологические аспекты использования местных видов топлива на основе биомассы в энергетических целях / О.Н. Редькин, Е.В. Зеленухо, В.И. Глуховский, С.А. Лаптенко // Международный научный журнал «Научные горизонты». – 2024. – № 7(83). – С. 76–90.

6. Thygesen O., Johnsen T. Manure-based energy generation and fertiliser production: Determination of calorific value and ash characteristics // Biosystems Engineering. – 2012. – Vol. 113, Issue 2. – P. 166–172.

7. Евдокимов Н.В., Александров А.В. Разработка технологии брикетирования древесных отходов с использованием связующей композиции на основе механоактивированного гидролизного лигнина // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 2-3 (7-3). – С. 65–68.

8. Кулагина Т.А., Кириллова И.В., Гурина Р.В. Композиционное твердое топливо на основе местных энергетических ресурсов // Справочник. Инженерный журнал. – 2025. – № 6(339). – С. 54–57.

9. Кулагина Т.А., Кириллова И.В. Усовершенствование состава топливных брикетов путем включения отходов кроличьих ферм // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2022): сб. ст. – Уфа, 2022. – С. 194–198.

10. Совершенствование производства круглых топливных брикетов из древесных опилок / А.Р. Бирман, Е.Г. Хитров, С.А. Угрюмов, Ю.Н. Власов // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2020. – № 1. – С. 41–46.

References

1. Pekarets, A.A., Akim, E.L. Sozdanie tekhnologii polucheniya toplivnykh i ugol'nykh briketov iz opilok drevesiny listvennitsy [Creation of technology for producing fuel and coal briquettes from sawdust of larch wood], *Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie», Sankt-Peterburg, 23–24 maya 2018 g.* [Materials of the III International Scientific and Technical Conference “Forests of Russia: politics, industry, science, education”, Saint-Petersburg, May 23–24 2018]. Saint-Petersburg, 2018, vol. 2, pp. 117–119.

2. Nikolaeva, L.A., Popov, S.N., Burenina, O.N., Solov'ev, T.M. Utilizatsiya otkhodov derevoobrabatyvayushchikh predpriyatiy Respubliki Sakha (Yakutiya) v toplivnye briкеты [Waste disposal of woodworking enterprises of the Republic of Sakha (Yakutia) in fuel briquettes]. *Internet zhurnal «Naukovedenie»*, 2017, vol. 9, no. 6, pp. 45–51.

3. Gnidan, E.V. Lignin drevesiny osiny: osobennosti sostava, stroeniya, frakcionirovaniya i konversii [Aspen wood lignin: features of composition, structure, fractionation and conversion]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2022, no. 4-2(118), pp. 162–166.

4. Wang, C., Zhang, S., Wu, S., Sun, M., Lyu, J. Multi-purpose production with valorization of wood vinegar and briquette fuels from wood sawdust by hydrothermal process. *Fuel*, 2020, vol. 282, pp. 3–9.

5. Red'kin, O.N., Zelenukho, E.V., Glukhovskiy, V.I., Laptenok, S.A. Ekologo-tekhnologicheskie aspekty ispol'zovaniya mestnykh vidov topliva na osnove biomassy v energeticheskikh tselyakh [Ecological and technological aspects of using local biomass-based fuels for energy purposes]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Nauchnye gorizonty»*, 2024, no. 7(83), pp. 76–90.

6. Thygesen, O., Johnsen, T. Manure-based energy generation and fertiliser production: Determination of calorific value and ash characteristics. *Biosystems Engineering*, 2012, vol. 113, issue 2, pp. 166–172.

7. Evdokimov, N.V., Aleksandrov, A.V. Razrabotka tekhnologii briketirovaniya drevesnykh otkhodov s ispol'zovaniem svyazuyushchey kompozitsii na osnove mekhanoaktivirovannogo gidroliznogo lignina [Development of technology for briquetting wood waste using a binding composition based on mechanoactivated hydrolysis lignin]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2014, vol. 2, no. 2-3(7-3), pp. 65–68.

8. Kulagina, T.A., Kirillova, I.V., Gurina, R.V. Kompozitsionnoe tverdoe toplivo na osnove mestnykh energeticheskikh resursov [Composite solid fuel based on local energy resources]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*, 2025, no. 6(339), pp. 54–57.

9. Kulagina, T.A., Kirillova, I.V. Usovershenstvovanie sostava toplivnykh briketov putem vklyucheniya otkhodov krolich'ikh ferm [Improving the composition of fuel briquettes by including rabbit farm waste]. *Sbornik statey «Nauka, obrazovanie, proizvodstvo v reshenii ekologicheskikh problem (Ekologiya–2022)»* [Collection of articles “Science, education, production in solving environmental problems (Ecology–2022)”]. Ufa, 2022, pp. 194–198.

10. Birman, A.R., Khitrov, E.G., Ugryumov, S.A., Vlasov, Yu.N. Sovershenstvovanie proizvodstva kruglykh toplivnykh briketov iz drevesnykh opilok [Improving the production of round fuel briquettes from sawdust]. *Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2020, no. 1, pp. 41–46.