

УДК 674.812

Я. П. Жарская, И. Г. Федосенко

Белорусский государственный технологический университет

ПОЛУЧЕНИЕ ТОПЛИВНЫХ ГРАНУЛ С ВЫСОКИМИ КАЧЕСТВЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИЗ ЩЕПЫ НИЗКОГО КАЧЕСТВА

Целью исследования является проверка возможности использования низкокачественной древесины как сырья для получения топливных гранул с высокими качественными характеристиками класса А2 согласно европейскому стандарту ISO 17225–2:2021. Актуальность вопроса переработки низкокачественной древесины в настоящее время достаточно высокая. Такая древесина не имеет положительного экономического эффекта, требует затрат на утилизацию, является крупнотоннажным отходом деревопереработки.

В порядке эксперимента топливные гранулы получали, используя щепу топливную хвойных пород, в которой присутствовали инородные включения и большое количество коры. Процесс получения топливных гранул сводился к удалению инородных включений из сырья, доизмельчению, гидротермической обработке сырья с последующим прессованием в кольцевой матрице до необходимой плотности гранул. Для подтверждения высокого качества полученного продукта сравнили его характеристики с пороговыми значениями согласно ISO 17225–2:2021.

Эксперимент показал, что при соблюдении определенной технологии производства можно получить гранулы класса А2 из низкокачественной топливной щепы, основное назначение которой заключается в получении тепловой энергии. Преимуществом является тот факт, что в технической документации нет требований к цвету гранул. Это положительно влияет на процесс производства ввиду того, что можно использовать разного рода сырье, не предъявляя строгих требований к его однородности, качеству и фракционному составу.

Ключевые слова: гранулы, топливная щепа, примеси, гидротермическая обработка, фракционный состав.

Для цитирования: Жарская Я. П., Федосенко И. Г. Получение топливных гранул с высокими качественными характеристиками из щепы низкого качества // Труды БГТУ. Сер. 2, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 210–216. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-24.

Ya. P. Zharskaya, I. G. Fedosenko

Belarusian State Technological University

PRODUCTION FUEL GRANULES WITH HIGH QUALITY CHARACTERISTICS FROM LOW-QUALITY WOOD

The purpose of the study is to test the possibility of using low-quality wood as a raw material to produce fuel pellets with high quality characteristics of class A2 according to the European standard ISO 17225–2:2021. The relevance of the issue of processing low-quality wood is currently quite high. Such wood does not have a positive economic effect, requires disposal costs, and is a large-tonnage wood processing waste.

As an experiment, fuel pellets were obtained using softwood fuel chips as raw materials, in which foreign inclusions and a high content of bark were present. The process of obtaining fuel granules was reduced to the removal of foreign inclusions from the raw material, regrinding, hydrothermal processing of the raw material, followed by pressing in a ring matrix to the required density of the granules. To confirm the high quality of the obtained product, its characteristics were compared with the threshold values according to ISO 17225-2:2021.

The experiment showed that, subject to a certain production technology, class A2 can be obtained from low-quality fuel chips, the main purpose of which is to obtain thermal energy. The advantage is the fact that there are no requirements for the color of the granules in the technical documentation. This has a positive effect on the production process due to the fact that various types of raw materials can be used without imposing strict requirements on its uniformity, quality and fractional composition.

Keywords: granules, fuel chips, impurities, hydrothermal treatment, fractional composition.

For citation: Zharskaya Ya. P., Fedosenko I. G. Production fuel granules with high quality characteristics from low-quality wood. *Proceedings of BSTU, issue 2, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 210–216. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-24 (In Russian).

Введение. Особенностью механической обработки древесины является снятие слоя материала с готовой продукции, что неизбежно приводит к образованию отходов, количество которых может достигать 70% объема сырья [1]. Эффективное использование отходов деревообработки и неликвидного древесного сырья в энергетических целях, как биомассы, является приоритетным направлением уже в нескольких пятилетках. К основным отходам лесопиления относятся кусковые отходы (22–32%) и опилки (22–24%) [2]. Промежуточным продуктом можно считать технологическую щепу, качество которой позволяет ее широко использовать по многим направлениям. Популярными направлениями использования отходов деревообработки являются: целлюлозно-бумажное и плитное производство, производство топлива и, в частности, древесных гранул.

В настоящее время сложилась ситуация, в которой топливные гранулы производят из технологической щепы или чистой измельченной древесины в виде щепы или дробленки, а то и стружки. При этом топливная щепка, которая используется в том виде, в котором получена, содержит много примесей как органической, так и минеральной природы. Кроме того, недостаточно внимания уделяется измельченной древесине как сырью для получения прессованного топлива.

Наиболее перспективным является использование топливной щепы в энергетических целях как экологически нейтрального топлива. Топливная щепка представляет собой низкокачественные измельченные кусковые отходы, которые образуются в результате лесозаготовок, в процессе механической обработки древесины, а также при измельчении низкотоварной древесины [3]. Топливная щепка может содержать значительный объем коры – 55–60%. Однако при подборе технологических режимов производства и необходимого количества вспомогательных добавок можно получить гранулы высоких классов – А1 и А2 согласно европейскому стандарту ISO 17225–2:2021 [4].

Исследованиями в области технологии производства гранул занимались многие ученые. О. Д. Мюллер [5] рассматривал в своей работе ряд факторов, которые влияют на качество пеллет: давление прессования, вспомогательные добавки, температура. Так, он утверждал, что влажность вспомогательных добавок (древесная мука, кукурузный крахмал) должна быть в диапазоне от 10 до 12%. Давление прессования должно быть в пределах 25–30 МПа. Наряду с этим обязательным этапом производства пеллет должно быть принудительное охлаждение готового продукта

при выходе из пресса. Все вышеперечисленные меры приводят к повышению качественных показателей гранул.

Вместе с О. Д. Мюллером значительный вклад в изучение вопроса производства гранул внес А. Н. Попов [6]. Он так же утверждал, что выдержка готового продукта при низких температурах позволит достичь лучшего качества, а именно увеличит механическую прочность гранул и их насыпную плотность. Последний критерий, в свою очередь, оказывает влияние на вместимость пеллет при их загрузке и транспортировке [7]. Он определил начальные свойства исходного сырья, такие как влажность не ниже 10–12%, температура прессования 85–95°C.

Л. А. Скорикова [8] в своих исследованиях описывает положительное влияние предварительной подготовки и сортировки древесного сырья. Уменьшение влажности исходного древесного материала до 10–12% с предварительной сортировкой по размерам частиц и по породам древесины может значительно повлиять на энергопотребление оборудования, что в свою очередь может оказать положительный эффект на технологию производства в целом. Разное по породной принадлежности и по фракционному составу сырье требует различных температурных режимов сушки и давления прессования. Важно заметить, что более энергозатратные режимы работы оборудования из-за увеличения выбросов в атмосферу негативно сказываются на экологии.

Тема энергозатрат на получение пеллет также была описана учеными D. Andreiko и J. Grochowicz [9], которые утверждали, что процесс гранулирования зависит от содержания влаги в сырье. Они пришли к выводу, что увеличение влажности материала перед прессованием снижает энергозатраты на этот процесс с 10 до 15%. Аналогичные выводы сделала и P. Rousset [10].

Представленные источники [5–10] дают основание полагать, что при разработке подходящей технологии производства, правильном подборе вспомогательных добавок можно получить качественные гранулы высоких классов из низкокачественной измельченной древесины, исключительным вариантом использования которой считается получение тепловой энергии.

Основная часть. Основной задачей эксперимента стало получение гранул класса по ISO 17225–2:2021 не ниже А2 из низкокачественной измельченной древесины (топливной щепы). Для проведения эксперимента использовалась щепка топливная, порода древесины – сосна. Влажность щепы составила от 35 до 45%. На рис. 1 представлена щепка топливная, которая подверглась первичному дроблению для создания необходимой фракции.



а



б

Рис. 1. Щепы топливная после дробления:
а – склад щепы; б – сравнение щепы технологической (слева) и топливной (справа)

Главным отличием гранул класса А2 от гранул класса А1 является такой показатель, как зольность. Для гранул класса А1 согласно ISO 17225-2:2021 показатель зольности не должен превышать 0,7%, для гранул класса А2 – не более 1,2%. Высокое содержание коры и присутствие инородных примесей в объеме топливной щепы существенно влияет на качество пеллет в целом и на зольность в частности [11].

Подготовка сырья подразумевает очистку щепы от инородных включений и первичное дробление до более мелкой фракции. Дробление проводилось на речипере мелкого дробления Bruks BK-DG 600×1200, который оборудован магнитом для улавливания металлических включений. На рис. 2 показан магнит речипера и металл, который был обнаружен после прохождения всего объема сырья через речипер.

Следующим технологическим этапом получения гранул является термическая обработка на сушильном барабане. Учитывая тот факт, что эксперимент проводился на работающей техно-

логической площадке ООО «СВУДС экспорт», которая специализируется на производстве гранул класса А1 из технологической щепы, одной из основных задач стала разработка режимов работы сушильного барабана, которые смогут безопасно высушить материал с содержанием коры 55–60%.



а



б

Рис. 2. Металлические включения в объеме топливной щепы:
а – магнит речипера;
б – металлические включения

Производство топливных гранул ООО «СВУДС экспорт» работает на щепе собственного производства, которая образуется после пиления круглого лесоматериала (естественная влажность 50–55%). Поэтому имеющиеся температурные режимы разработаны под указанную естественную влажность исходного сырья. Таким образом, необходимо было разработать новые технологические режимы. При проведении трех экспериментов был получен оптимальный режим

работы сушильного комплекса, который позволил получить сырье с влажностью 10–12%. По результатам эксперимента оптимальный режим работы – это низкотемпературный режим № 3 (табл. 1).

Таблица 1
Технологические режимы работы сушильного оборудования

Параметры	Единица измерения	Режим		
		№ 1	№ 2	№ 3
Температура в котле	°С	1050	1000	950
Температура перед сушильным барабаном	°С	540	490	450
Количество подаваемого материала	м ³ /т	12–14	11–13	10–12
Начальная влажность опилок	%	35–45		
Конечная влажность опилок	%	14,5	13	11,5

Следующим этапом проводится доизмельчение высушенной древесины до фракции, подходящей для прессования. Доизмельчение выполняется на молотковой дробилке CPM Champion с размером ячейки сит 5–7 мм.

Важную роль играет норма расхода вспомогательных добавок. Для проведения эксперимента в качестве вспомогательной добавки было выбрано природное вяжущее, традиционно присутствующее в растениях, – крахмал, в частности, кукурузный [12]. Согласно ISO 17225–2:2021, количество вводимых добавок не должно превышать 2% от массы.

В ходе эксперимента была подобрана оптимальная норма расхода кукурузного крахмала. За отправную точку для определения оптимальной нормы расхода было взято значение 5 кг/т. Данная норма расхода является утвержденной и применяемой на производстве топливных древесных гранул на ООО «СВУДС экспорт». С учетом допустимого количества вспомогательных добавок, согласно технической документации, дополнительно были получены образцы топливных гранул с содержанием крахмала 2,5, 4,0 и 6,0 кг/т. Подобранные параметры прессования указаны в табл. 2. По результатам эксперимента оптимальный режим прессования – режим № 3. Норма расхода крахмала кукурузного, при которой полученный образец гранул соответствует требуемому качеству, – 5,0 кг/т.

Таблица 2
Технологические режимы процесса прессования топливных гранул

Параметры	Единица измерения	Режим			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Загруженность пресса	%	90–95			
Давление прессования	МПа	25–30	30–35	25–30	25–30
Температура перед прессом	°С	50	53	55	57
Норма расхода крахмала	кг/т	2,5	4,0	5,0	6,0

Основой процесса гранулирования древесины являются процессы плавления лигнина – одного из основных веществ, входящих в состав древесины, и его отвердевания [12]. На рис. 3 представлен пресс-гранулятор CPM 7932-5, оборудованный двумя роликами и кольцевой матрицей. Производительность данного оборудования составляет 4,5 т готовой продукции за 1 ч.



Рис. 3. Пресс-гранулятор CPM 7932-5

Необходимую температуру и влажность древесной массы перед прессованием регулируют установленным парогенератором Steam 500. Подача пара осуществляется в смесительную камеру, куда подается крахмал кукурузный и древесные опилки. Воздействие пара позволяет разогреть материал до температуры в 50–60°С. Дополнительный прогрев материала осуществляется в рабочей зоне пресса за счет трения и давления между материалом, матрицей и прессующими роликами [13].

Завершающим этапом эксперимента стало охлаждение гранул в холодильных установках в течение 45 мин при постоянном перемешивании для равномерного остывания. Холодильная

установка фирмы Champion оснащена системой «подвижные полы», которая по мере перемещения обеспечивает прохождение потока атмосферного воздуха через объем гранул, тем самым осуществляется равномерное охлаждение всего объема пеллет, находящихся одновременно в установке. Согласно технической документации для безопасной транспортировки и хранения, температура гранул после охлаждения не должна превышать 40°C. Равномерный обдув атмосферным воздухом позволяет добиться снижения температуры готовой продукции. Для упаковки готовой продукции температура гранул не должна превышать 20–22°C [14].

На рис. 4 показаны гранулы класса А1 и полученный образец гранул, который полностью соответствует требованиям по качеству, предъявляемым к гранулам класса А2. Контроль качества проводился согласно методикам ISO 17831–1:2015 [15].



а



б

Рис. 4. Топливные гранулы из древесины:
а – гранулы класса А1; б – гранулы класса А2

В табл. 3 представлено сравнение качественных показателей топливных гранул класса А1 и А2 согласно ISO 17225–2:2021 с полученным образцом. Оценка качества проводилась согласно

разработанным производственным методикам на основе EN Plus v3 ISO 17225–2:2021 в современной, полностью укомплектованной производственной лаборатории ИООО «СВУДС экспорт». Применяемое лабораторное оборудование имеет поверку БелГИМ от 14 апреля 2022 г.

Таблица 3

Сравнение качественных показателей

Параметр	Единица измерения	ENplus A1	ENplus A2	Топливная гранула
Диаметр	мм	6 ± 1; 8 ± 1		6
Влажность	%	≤10		6,0
Зольность	%	≤0,7	≤1,2	0,9
Механическая прочность	%	≥98	≥97,5	98,7
Мелкая фракция	%	≤0,5 (≤1)		0,1
Насыпная плотность	кг/м ³	600 ≤ НП ≤ 750		622

Заключение. В ходе эксперимента были подобраны технологические параметры работы оборудования, на основании которых была произведена партия топливных гранул из низкосортной измельченной древесины (топливная щепа). Общий объем партии составил 54,5 т. Внедрение технологии подтверждено Актом о практическом использовании результатов исследования в технологический процесс производства топливных древесных гранул ООО «СВУДС экспорт».

Анализ научных источников определил перечень технологических параметров, которые в течение всего эксперимента проверялись опытным путем на функционирующем производстве с целью их корректировки под определенный вид сырья – топливная щепа с высоким содержанием коры. Производство топливных гранул из технологической щепы является темой достаточно изученной и уже внедренной на предприятиях Республики Беларусь. Вопрос о производстве гранул из низкосортной древесины, которая является основным источником получения топливной щепы, потребовал изучения, так как данный материал как вид сырья сравнительно новый и не в полной мере изучен.

Получение топливных гранул с высокими качественными характеристиками из щепы низкого качества проходило в несколько этапов. На начальном этапе была произведена подготовка древесного материала, которая включала в себя прохождение объема топливной щепы через магнит рубительной машины с последующим доизмельчением до необходимой фракции. При прохождении через магнит были отсортированы все металлические включения, которые при последующем попадании в оборудование могли повлиять на ход эксперимента.

Следующий этап – термическая обработка опилок на сушильном барабане согласно разработанным технологическим параметрам. После термической обработки древесные опилки были поданы к участку прессования, где согласно режимам прессования, разработанным под данный эксперимент, было осуществлено прессование древесного материала с предварительным добавлением крахмала кукурузного (норма расхода 5 кг/т) и разогревом полученной смеси до температуры 55°C.

После процесса прессования топливные гранулы прошли процесс охлаждения до температуры 20–22°C.

Результатом эксперимента стала партия топливных гранул, которые по всем параметрам качества соответствуют продукту, пригодному для реализации на отечественном и Европейском рынках. Контроль качества проводился, опираясь на критерии оценки согласно европейскому стандарту ISO 17225–2:2021.

Детальная проработка вопроса эффективного использования низкосортной топливной щепы показала, что данный вид отходов является подходящим сырьем для производства топливных гранул при правильно подобранных режимах работы производства.

Список литературы

1. Древесина и древесные материалы: сб. ст. / Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР. Красноярск, 1974, 238 с.
2. Коробов В. В., Рушнов Н. П. Переработка низкокачественного сырья (проблемы безотходной технологии). М.: Экология, 1991. 288 с.
3. Алексеев И. А. Качественная оценка лесов. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. 69 с.
4. Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 2: Graded wood pellets: ISO 17225–2:2021. Vernier, Geneva: ISO, 2021. 16 с.
5. Мюллер О. Д. Математическая модель процесса формирования древесных гранул // Лесной журнал. 2015. № 2. С. 37–44.
6. Попов А. Н. Исследование процесса производства древесных гранул с целью повышения их энергетического использования: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 151 с.
7. Thek G., Obernberger I. The pellet Handbook. The Production and Thermal Utilisation of Pellets. London: Washington DC: Routledge, 2010. 593 с.
8. Скорикова Л. А. Обоснование состава топливных гранул и технологии подготовки древесных опилок для их производства: дис. ... канд. техн. наук. Йошкар-Ола, 2012. 152 с.
9. Andreiko D., Grochowicz J. Studies of H-NMR Relaxation Dispersion in Human Brain-tissue Samples: Implications for Magnetic Resonance Relaxation Dispersion Imaging. Magnus Ljungvall, Hamburg: 2012. 22 с.
10. Rousset P. Study of again research material: wood, metal, plastic. Zloven, Slovakia: Friedrich and Luible, 2008. 141 с.
11. Мюллер О. Д. Совершенствование технологии производства древесных гранул: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2015. 269 с.
12. Крахмал кукурузный. Общие технические условия: ГОСТ 32159–2013. М.: Стандартиформ, 2019. 11 с.
13. Чибирев О. В., Куницкая О. А., Ильюшенко Д. А. Экспериментальные исследования прессования опилок древесины сосны на гидравлическом прессе // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2016. № 217. С. 87–92.
14. Swaan J. Best Practices for Fighting and Preventing a Fire in a Wood Pellet Storage Dome or Silo. Washington DC: Future Metrics LLC, 2017. 34 с.
15. Биотопливо твердое. Определение механической прочности пеллет и брикетов: ISO 17831–1:2015. М.: Стандартиформ, 2018. 12 с.

References

1. *Drevesina i drevesnyye materialy: sbornik statey* [Wood and wood materials: digest of articles]. Krasnoyarsk, 1974. 238 p. (In Russian).
2. Korobov V. V., Rushnov N. P. *Pererabotka nizkokachestvennogo syr'ya (problemy bezotkhodnoy tekhnologii)* [Processing of low-quality raw materials (problems of waste-free technology)]. Moscow, Ekologia Publ., 1991. 288 p. (In Russian).
3. Alekseev I. A. *Kachestvennaya otsenka lesov* [Qualitative assessment of forests]. Yoshkar-Ola, MarGTU Publ., 2006. 69 p. (In Russian).
4. ISO 17225–2:2021. Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 2: Graded wood pellets. Vernier, Geneva, ISO, 2021. 16 p.
5. Muller O. D. Mathematical model of the wood pellet formation process. *Lesnoy zhurnal* [Forest Journal], 2015, no. 2, pp. 37–44 (In Russian).

6. Popov A. N. *Issledovaniye protsessa proizvodstva drevesnykh granul s tsel'yu povysheniya ikh energeticheskogo ispol'zovaniya. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of the production process of wood pellets in order to increase their energy use. Dissertation PhD (Engineering)]. Moscow, 2016. 151 p. (In Russian).
7. Thek G., Obernberger I. *The pellet Handbook. The Production and Thermal Utilisation of Pellets*. London, Washington DC, Routledge, 2010. 593 p.
8. Skorikova L. A. *Obosnovaniye sostava toplivnykh granul i tekhnologii podgotovki drevesnykh opilok dlya ikh proizvodstva. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Substantiation of the composition of fuel granules and technology for the preparation of sawdust for their production. Dissertation PhD (Engineering)]. Yoshkar-Ola, 2012. 152 p. (In Russian).
9. Andreiko D., Grochowicz J. *Studies of H-NMR Relaxation Dispersion in Human Brain-tissue Samples: Implications for Magnetic Resonance Relaxation Dispersion Imaging*. Hamburg, Magnus Ljungvall, 2012. 22 p.
10. Rousset P. *Study of again research material: wood, metal, plastic*. Zloven, Slovakia, Friedrich and Luible, 2008. 141 p.
11. Muller O. D. *Sovershenstvovaniye tekhnologii proizvodstva drevesnykh granul. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improving the technology for the production of wood pellets. Dissertation PhD (Engineering)]. Arkhangelsk, 2015. 269 p. (In Russian).
12. GOST 32159–2013. *Corn starch. General specifications*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 11 p. (In Russian).
13. Chibirev O. V., Kunitskaya O. A., Ilyushenko D. A. *Experimental studies of pressing pine sawdust on a hydraulic press. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy], 2016, no. 217, pp. 87–92 (In Russian).
14. Swaan J. *Best Practices for Fighting and Preventing a Fire in a Wood Pellet Storage Dome or Silo*, Washington DC, Future Metrics LLC, 2017. 34 p.
15. ISO 17831–1:2015. *Solid biofuels. Determination of the mechanical strength of pellets and briquettes*. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 12 p. (In Russian).

Информация об авторах

Жарская Яна Петровна – аспирант, магистр технических наук кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь); начальник производства топливных древесных гранул. ООО «СВУДС экспорт» (222515, г. Борисов, ул. Демина, 11А, Республика Беларусь). E-mail: yana.zarskaya@swse.by

Федосенко Иван Гаврилович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Ivan.fedosenko@mail.ru

Information about the authors

Zharskaya Yana Petrovna – PhD student, Master of Engineering the Department of Woodworking Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus); Head of production of fuel wood pellets. LLC “SWOODS export” (11A, Demina str., 222515, Borisov, Republic of Belarus). E-mail: yana.zarskaya@swse.by

Fedosenko Ivan Gavriilovich – PhD (Engineering), Associate Professor, the Department of Woodworking Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Ivan.fedosenko@mail.ru

Поступила 20.03.2023