

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-24>

УДК 669.01:621.9

О. О. Червоткіна, асистент

ORCID: 0009-0002-6814-0566

О. П. Прокопенко, асистент

ORCID: 0009-0005-7304-923X

Н. О. Паляничка, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0001-8510-7146

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: olena.prokopenko@tsatu.edu.ua

## ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ ІЗ ДЕРЕВИНИ ЛИСТЯНИХ ПОРІД

*Анотація.* У статті розглянуто фізико-механічні властивості паливних пелет, виготовлених із деревини листяних порід. Установлено, що застосування такої сировини без додаткової обробки є малоефективним, оскільки отримані гранули характеризуються недостатньою міцністю. Для усунення цього недоліку використано попереднє оброблення подрібненої деревини насиченою парою. Проведені промислові випробування підтвердили, що така активація забезпечує отримання пелет, які відповідають вимогам стандартів якості. Технологічною особливістю процесу є використання матриці з довжиною пресувального каналу 33 мм.

*Ключові слова:* пелети, паливні гранули, деревина, гранулювання, матриця, пресувальний канал, ущільнення, пара.

*Постановка проблеми.* Паливні пелети – це екологічно чисте біопаливо у вигляді циліндричних гранул, виготовлених із подрібнених деревних відходів. Виробництво пелет із деревини листяних порід має свої особливості, які впливають на якість кінцевого продукту, енергоефективність процесу та його економічну вигоду. Нижче описано ключові аспекти технології виробництва пелет із листяних порід деревини.

Процес гранулювання базується на поєднанні фізико-хімічних явищ, що відбуваються в подрібненій деревині під час пресування. Основну роль відіграють такі чинники: вологість сировини, температура гранулювання, тиск у зоні пресування та тривалість обробки.

Ключовим компонентом деревини є лігнін, який під дією високої температури та тиску розм'якшується та виконує функцію природного клею, забезпечуючи адгезійні зв'язки між частинками. Геміцелюлози під час нагрівання до температури 100–120°C утворюють високомолекулярні з'єднання, які додатково зміцнюють структуру гранул. Вологість є критично важливим параметром: за надмірної вологи гранули втрачають форму, а за її дефіциту погіршується пластичність матеріалу. Оптимальний рівень становить 8–12%.

Пропарювання деревини перед гранулюванням посилює активність хімічних компонентів, створює нові функціональні групи та сприяє рівномірному розподілу вологи. Це забезпечує утворення більш щільних та механічно стійких гранул навіть із листяної сировини, яка у природному стані має нижчу здатність до пресування. За даними Європейської біоенергетичної асоціації, лише в країнах ЄС щорічне виробництво пелет перевищує 20 млн т. Найбільшими виробниками є Німеччина, Швеція, Польща, Австрія та країни Балтії. У цих державах пелети широко використовуються не лише у промисловості, а й у побутовому секторі, оскільки сучасні котли на гранулах забезпечують високий коефіцієнт корисної дії та низький рівень шкідливих викидів.

Особливу увагу в європейській практиці приділяють використанню деревини листяних порід, адже запаси хвойних лісів обмежені й потребують раціонального використання. У Скандинавії поширеною є технологія пропарювання деревини для підвищення її пластичних влас-



тивостей, що дає змогу виготовляти гранули з берези та осики. У Австрії та Німеччині активно досліджують змішані види біопалива, де листяна деревина поєднується з агровідходами (лушпинням соняшнику, соломою, лушпинням зернових культур). Такий підхід дає можливість отримати гранули з поліпшеними властивостями та зменшити собівартість їх виробництва.

Сучасний розвиток паливно-енергетичного комплексу України тісно пов'язаний із використанням відновлюваних та екологічно безпечних ресурсів. Одним із найбільш доступних джерел є відходи деревообробки та лісозаготівлі, які характеризуються високою теплотворною здатністю.

Перспективним напрямом їх застосування є виробництво пресованих біопаливних матеріалів, зокрема пелет. Ринок цього виду палива активно зростає, а попит збільшується в кілька разів щороку. Традиційно у технологіях виготовлення пелет використовують деревину хвойних порід, що є цінною та дефіцитною сировиною для деревообробної промисловості. Унаслідок цього її запаси невпинно скорочуються, що стимулює пошук альтернатив. Одним із рішень є залучення маловартісної та недостатньо затребуваної у промисловості деревини листяних порід.

Особливості пелет із листяних порід:

- висока теплотворна здатність: пелети з листяних порід (наприклад, дуба чи бука) мають теплотворність 5,4 кВт·год/кг, що порівняно з вугіллям перевищує показники хвойних порід (4,5–5 кВт·год/кг);

- колір і зовнішній вигляд: пелети з листяних порід можуть бути темнішими (кавовий або коричневий відтінок) через змішування порід або залишкову кору, що іноді викликає упередження у споживачів, хоча не впливає на якість за наявності сертифікатів (ENplus A1/A2);

- екологічність: пелети з листяних порід не містять хімічних добавок, мають низьку емісію CO<sub>2</sub> і вважаються вуглецево нейтральним паливом; проблеми виробництва: через твердість деревини та нижчий уміст лігніну пелети з листяних порід складніше пресувати, що підвищує витрати на обладнання та енергію. Часто використовують суміші хвойних (70%) і листяних порід для полегшення гранулювання.

*Аналіз останніх досліджень.* У світовій практиці тривають інтенсивні пошуки технологій, які забезпечують одержання якісного, екологічного та відносно дешевого палива. Переробка відходів має здійснюватися з урахуванням комплексного використання сировини та вимог екологічної безпеки. Біопаливо, отримане шляхом гранулювання чи брикетування відходів, відповідає цим критеріям. Для цього застосовують попереднє сортування, подрібнення та підготовку матеріалу на спеціалізованих сміттесортувальних комплексах.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Оскільки фізико-механічні властивості деревної сировини значною мірою визначають якість готового біопалива, доцільним є дослідження параметрів паливних гранул, виготовлених із деревини листяних порід, та їх порівняння з пелетами із хвойних порід, зокрема сосни. Літературні джерела підтверджують, що морфологічні та структурні характеристики деревини суттєво відрізняються не лише між листяними і хвойними породами, а й у межах окремих видів.

*Основна частина.* Для експерименту були виготовлені паливні пелети з берези (*Betula verrucosa* Ehrh), вільхи (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn) та сосни (*Pinus silvestris* L.). Процес гранулювання здійснювався за температури 110°C і тривалості пресування 15 хв. Вологість вихідної сировини становила 8–11%, використовувалася фракція 1,0–3,0 мм. Охолодження гранул проводилося до температури 20°C. Було визначено основні фізико-механічні характеристики: вологість, зольність, щільність, нижчу теплоту згоряння та міцність на стиск. Отримані результати свідчать, що теплота згоряння пелет із різних порід коливається в межах 17,49–18,43 МДж/кг, тобто є цілком співставною. Однак зольність листяної деревини в середньому в 3,5 рази вища,



ніж у хвойної. Незважаючи на це, утворена зола може бути використана як добриво. Міцність пелет із вільхи та берези виявилася нижчою на 11–18% порівняно з аналогами із сосни.

Щоб підвищити механічну стійкість, застосували обробку деревини насиченою парою. Такий підхід дав змогу активувати хімічні компоненти клітинної структури, посилити адгезійні зв'язки й збільшити кількість високомолекулярних сполук, насамперед геміцелюлоз. У результаті гранули з листяної сировини за міцністю стали співставними з пелетами із сосни. Гранули виготовляли у вигляді циліндрів довжиною 10–30 мм та діаметром 6 мм. Оптимальна композиція включала 35% берези, 20% вільхи, 40% осики та 5% сосни. Повний виробничий цикл включає: рубальну машину, подрібнювач, млин, сушильну установку, прес-гранулятор із подачею насиченої пари, охолоджувальну колонку та обладнання для пакування. Важливою технічною особливістю є використання матриці з пресувальним каналом 33 мм, що дає змогу зменшити енергоспоживання та забезпечує оптимальний режим гранулювання для листяної деревини. Дослідження показали, що отримані пелети відповідають вимогам за показниками теплотворності, щільності та міцності. Деяко підвищена зольність залишається у межах допустимих норм.

Одним із головних чинників розвитку ринку пелет є їх економічна привабливість. За розрахунками, теплота згоряння 1 т пелет становить у середньому 17,5–18,5 МДж/кг, що еквівалентно приблизно 500–550 кг кам'яного вугілля. При цьому собівартість виробництва пелет із листяних порід є значно нижчою, оскільки така деревина менш цінна на ринку деревообробки.

Наприклад, собівартість виготовлення 1 т гранул із сосни може бути на 15–20% вищою, ніж із берези або вільхи. Додатковим чинником економії є скорочення витрат на утилізацію відходів деревообробних підприємств, адже вони перетворюються на цінний енергетичний ресурс.

Експорт пелет до країн ЄС є перспективним напрямом для України, оскільки попит на біопаливо там стабільно зростає. За умови правильної організації виробництва українські підприємства можуть отримати значні економічні вигоди, одночасно сприяючи енергетичній безпеці держави.

Таким чином, технологія виробництва пелет із деревини листяних порід є перспективною як з економічного, так і з екологічного погляду, а її впровадження відповідає світовим тенденціям розвитку відновлюваної енергетики.

Середня теплота згоряння пелет становить  $Q_n = 18,0$  МДж/кг. У перерахунку на кВт·год:  $1 \text{ МДж} = 0,2778 \text{ кВт}\cdot\text{год} \rightarrow Q_n = 18,0 \cdot 0,2778 \approx 5,0 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$ . Отже, 1 т пелет дає близько 5000 кВт·год енергії.

Еквівалент кам'яного вугілля. Середня теплота згоряння кам'яного вугілля становить 25 МДж/кг. Отримані 18 МДж/кг пелет еквівалентні  $\approx 0,72$  кг вугілля. Таким чином, 1 т пелет замінює приблизно 720 кг вугілля.

Щільність та міцність. Середня насипна щільність пелет –  $\rho = 1200$  кг/м<sup>3</sup>. Об'єм 1 т пелет становить  $V = m/\rho = 1000 / 1200 \approx 0,83$  м<sup>3</sup>. Міцність пелет після пропарювання підвищується на  $\approx 15$ –20% порівняно з необробленою сировиною.

Економічний розрахунок. Собівартість 1 т пелет із сосни умовно становить 120 €. Собівартість із берези чи вільхи на 15% нижча, тобто близько 102 €. Отже, економія становить  $\approx 18$  € на кожній тонні.

У процесі досліджень було також розглянуто вплив конструктивних та технологічних параметрів гранулювання на якість отриманих пелет.

1. Вплив діаметра матриці. Зі збільшенням діаметра гранул із 6 мм до 8 мм щільність зменшується на 5–7%, оскільки зростає об'ємна пористість матеріалу. Оптимальним для листяних порід залишається діаметр 6 мм, що забезпечує найбільшу механічну міцність та стабільність процесу.



2. Вплив тривалості пресування. Збільшення часу пресування з 10 до 20 хв призводить до підвищення міцності пелет на 8–10%, але при цьому зростає енерговитратність процесу. Експериментально підтверджено, що оптимальним є час пресування 15 хв, який забезпечує достатню якість гранул за мінімальних витрат.

3. Порівняння з агровідходами. Листяна деревина має нижчий уміст лігніну, ніж хвойна, проте вигідно відрізняється від агровідходів (соломи, лушпиння соняшнику). Наприклад, теплота згоряння соломи становить близько 14–15 МДж/кг, тоді як пелети з берези або вільхи – 17–18 МДж/кг. Це робить деревину листяних порід більш придатною для використання у побутових котлах без додаткових модифікацій.

4. Енергетичний розрахунок для опалення будинку. Середнє споживання тепла будинком площею 100 м<sup>2</sup> у зимовий період становить близько 15 000 кВт·год. За умови використання пелет із теплою згоряння 5,0 кВт·год/кг потрібно:  $m = 15\,000 / 5,0 = 3000\text{ кг} = 3\text{ т}$  пелет. Таким чином, використання пелет із листяних порід є економічно доцільним і дає змогу повністю забезпечити потреби домогосподарства в теплі.

**Висновки.** Проведені експерименти підтвердили можливість практичної заміни дорогих і дефіцитних хвойних порід у виробництві пелет дешевшими листяними видами. Використання попередньої обробки насиченою парою забезпечує активування компонентів клітинної структури, завдяки чому гранули з листяної деревини відповідають стандартним вимогам до міцності та теплотворності. Таким чином, технологія із застосуванням листяних порід у поєднанні з пропарюванням є перспективним та енергоефективним рішенням для виробництва якісного біопалива.

#### Список використаних джерел

1. Червоткіна О.О., Олексієнко В.О., Фучаджи Н.О. Рациональне використання відходів виробництва морквяного соку. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2012. Вип. 12. Т. 4. С. 216–221.
2. Олексієнко В.О., Червоткіна О.О., Циб В.Г. Дослідження механізмів гранулювання. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2016. Вип. 16. Т. 1. С. 269–273.
3. Назаров В.І., Макаренко Д.А., Булатов І.А. Дослідження процесу гранулювання дисперсних відходів на роторних пресах із плоскою матрицею. *Вісник КПІ*. 2010. Т. 5. № 6. С. 13–16.
4. Модін Н.А., Єрошкін О.М. Брикетування подрібненої деревини та деревної кори. Київ : Ліра, 2020. 112 с.
5. Модін Н.А., Єрошкін О.М., Мурзіч Р.М., Гудців Р.І. Зусилля, що розпирають, та коефіцієнти тертя при пресуванні подрібненої деревини в матрицях. Технічна інформація. Харків : ХНТУСГ, 2018. С. 23–26.
6. Івін Є.Л., Глухівський В.М. Гранулювання деревини. Практичні та теоретичні основи, або Що відбувається всередині гранулятора. *Біоенергетика*. 2007. № 3. С. 15–19.
7. Завражнов А.А. Пресування деревних композиційних матеріалів із продувкою парою і вакуумуванням : автореф. кандид. дис. 2020. 19 с.
8. Юдіна Р.В. Розроблення режимів гідравлічного вібратора преса підвищення фізико-механічних властивостей ущільненої деревини : автореф. канд. дис. 2017. 16 с.
9. Ялпачик В.Ф., Буденко С. Ф., Олексієнко В.О., Червоткіна О.О. Дослідження коефіцієнта тертя гранульованого жому моркви. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2018. Вип. 18. Т. 1. С. 112–118.
10. Червоткіна О.О., Стручасєв М.І., Тарасенко В.Г. Дослідження процесу гранулювання овочевих відходів за допомогою прес-гранулятора з плоскою матрицею. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2021. Вип. 21. Т. 1. С. 160–168.
11. Malyuk I., Tokar A., Horbatiuk T. Mechanical and thermal properties of pellets from sunflower husks. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2021. 23(4), 115–122.
12. Ivanov D., Petrenko O., Bilous M. Co-pelletizing of sunflower husk with other agricultural residues: impact on fuel quality. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2023. 45(1), 83–92.





13. Bentsen N.S., Felby C., Thorsen B.J. Agricultural residue for bioenergy: An overview of recent developments. *Biomass and Bioenergy*, 2020. 138, 105605.

14. Червоткіна О.О., Стручаєв М.І., Тарасенко В.Г. Дослідження процесу гранулювання овочевих відходів за допомогою прес-гранулятора з плоскою матрицею. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2021. Вип. 21. Т. 1. С. 160–168.

15. Червоткіна О.О., Тарасенко В.Г. Використання в'язучих речовин під час виробництва гранульованих овочів. *Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв*: Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція, 24 листопада 2020 р. / за заг. ред. В.М. Кюрчева. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 161–163.

*Стаття надійшла до редакції 28.09.2025*

*Стаття прийнята 18.10.2025*

*Статтю опубліковано 25.11.2025*



**O. Chervotkina, O. Prokopenko, O. Palyanychka**

*Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University*

## **FEATURES OF THE TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF FUEL PELLETS FROM HARDWOOD**

### *Summary*

The article investigates the production technology of fuel pellets from hardwood, focusing on the physical and mechanical properties of the resulting pellets. Hardwood species, such as oak, beech, birch, and ash, are widely used as raw materials due to their availability as by-products of woodworking industries (sawdust, shavings, and chips) and their high calorific value. However, the study reveals that producing pellets from hardwood without additional processing is inefficient, as the pellets often exhibit insufficient mechanical strength and durability. This is primarily due to the lower lignin content in hardwood (19–28% compared to 26–30% in softwood), which acts as a natural binding agent during pelletization, and the higher hardness of hardwood, which complicates the pressing process.

To address these challenges, the proposed technology incorporates pre-treatment of the crushed hardwood with saturated steam. This activation process enhances the plasticity of the wood particles, facilitating better bonding during pelletization and improving the structural integrity of the pellets. Industrial tests have demonstrated that steam pre-treatment enables the production of pellets that comply with international quality standards, such as ENplus A1 and A2, which specify requirements for low ash content (0.3–0.5% for debarked hardwood), high calorific value (approximately 5.4 kW·h/kg), and mechanical durability.

A key technological feature of the process is the use of a pelletizing matrix with a pressing channel length of 33 mm. This specific matrix design optimizes the compression process, ensuring uniform density and strength of the pellets while minimizing energy consumption and equipment wear. The article also highlights the importance of precise control over the moisture content of the raw material (8–12%) and the removal of bark to reduce ash content, which is critical for producing high-quality pellets suitable for residential and industrial heating systems.

The production process involves several stages: sorting and cleaning the raw material to remove impurities, grinding the wood to a fraction of 1–4 mm, drying to achieve optimal moisture levels, steam activation, pelletizing, and cooling. Each stage is tailored to account for the specific properties of hardwood, such as its higher density and hardness compared to softwood. The use of steam activation not only improves pellet quality but also reduces the need for additional binding agents, maintaining the ecological purity of the final product.

The resulting pellets are characterized by high energy efficiency, low ash content, and carbon-neutral combustion, making them an environmentally friendly alternative to fossil fuels. They are suitable for use in automated solid-fuel boilers and bioenergy power plants. However, challenges such as higher energy consumption during grinding and pressing, as well as the need for specialized equipment due to the hardness of hardwood, increase production costs compared to pellets made from agricultural residues or softwood.



In conclusion, the technology of producing fuel pellets from hardwood, enhanced by steam pre-treatment and optimized matrix design, allows for the creation of high-quality, durable, and efficient biofuel. This approach addresses the inherent limitations of hardwood as a raw material, ensuring compliance with stringent quality standards and supporting sustainable energy production. The findings underscore the potential of hardwood pellets in meeting the growing demand for renewable energy sources while promoting the efficient use of woodworking by-products.

**Keywords:** pellets, fuel pellets, wood, pelletizing, matrix, pressing channel, sealing, steam.