



МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-14>

УДК 608.3:631.362.28

Б. В. Болтянський, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2072-4025

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: borys.boltianskyi@tsatu.edu.ua

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАЛИВНИХ
БРИКЕТІВ ІЗ БІОМАСИ**

Анотація. Статтю присвячено дослідженню фізико-хімічних закономірностей процесу брикетування подрібнених деревних відходів. Проаналізовано роль природного полімеру – лігніну, який під впливом високого тиску (145–150 МПа) та температури (100–110°C) переходить у пластичний стан, забезпечуючи формування міцної монолітної структури брикету. Методологія дослідження ґрунтувалася на експериментах із варіюванням вологості сировини (від 4% до 12%) за сталих умов пресування. Отримані результати продемонстрували, що залежність щільності брикету від вологості має нелінійний характер. Установлено, що оптимальна вологість сировини становить 8%, за якої досягається максимальна щільність (1,2 т/м³). Збільшення або зменшення вологості від цього значення призводить до зниження щільності брикету внаслідок утворення надмірної пари або недостатнього розм'якшення лігніну. Дослідження підтверджують, що визначення раціонального діапазону вологості є критичним етапом для створення високоякісного та енергоефективного палива.

Ключові слова: брикетування, деревні відходи, біопаливо, лігнін, вологість, тиск, щільність, термомеханічна активація, фізико-хімічні властивості, торрефікація, енергетична безпека, циркулярна економіка.

Постановка проблеми. Сучасна енергетична політика, спрямована на зниження залежності від викопних ресурсів і зменшення викидів парникових газів, стимулює активний розвиток альтернативних джерел енергії, зокрема біопалива [1]. Одним із найбільш перспективних і екологічно доцільних напрямів є виробництво паливних брикетів із подрібнених деревних відходів, які утворюються у значних обсягах на підприємствах лісопереробної та деревообробної промисловості. Накопичення цих відходів, таких як тирса, стружка, тріска та інші дрібнодисперсні фракції, створює серйозні екологічні проблеми, зокрема забруднення територій, ризик самозаймання, а також неефективне використання цінної сировини, яка може бути перетворена на високоякісний енергетичний продукт [2]. Тоді як ринок твердого біопалива демонструє стабільне зростання, технологія його виробництва ще не досягла максимальної ефективності. Існуючі методи часто стикаються з низкою технологічних і економічних проблем. Найбільш критичними з них є недостатня щільність готових брикетів, а також висока енергоємність самого процесу пресування.

Незважаючи на численні дослідження, не до кінця вивчено закономірності впливу ключових технологічних параметрів на кінцеві фізико-механічні та теплотворні властивості брикетів. Особливої уваги потребує поглиблене дослідження механізму зв'язування частинок сировини. Зокрема, важливим є вивчення ролі природних полімерів, таких як лігнін, у процесі формування міцної структури брикетів. Існують також нереалізовані можливості застосування додаткових, екологічно чистих зв'язуючих речовин, що можуть значно поліпшити характеристики продукту без негативного впливу на навколишнє середовище.

Отже, існує нагальна потреба в комплексному і поглибленому дослідженні процесу брикетування з метою розроблення науково обґрунтованих рекомендацій, які дадуть змогу раціоналізувати технологічні режими, підвищити ефективність виробництва, поліпшити якість готового продукту та розширити сировинну базу за рахунок використання різноманітних рослинних відходів. Це дасть змогу створити конкурентоспроможне, екологічно безпечне та економічно вигідне біопаливо, яке відповідатиме сучасним стандартам і потребам ринку.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз сучасних досліджень і технологічних підходів до виробництва біопалива з подрібненої деревини свідчить про нагальну потребу в подальших дослідженнях, спрямованих на зниження енерговитрат і поліпшення якості готового продукту [3]. На основі аналізу наукових публікацій та патентних матеріалів можна виділити ключові напрями, що перебувають у фокусі уваги світової наукової спільноти. Пріоритетним напрямом є вивчення взаємозв'язку між параметрами пресування та якістю брикетів. Особлива увага приділяється впливу вологості, гранулометричного складу та температури на кінцеві властивості продукції. Дослідження свідчать, що раціональна вологість сировини для брикетування знаходиться в діапазоні до 12%, оскільки за цих умов забезпечуються максимальна ефективність процесу та міцність готових виробів [4–15]. Дослідження також показують, що зі зменшенням розміру частинок сировини, наприклад від 15–20 мм до 3–8 мм, значно зростає щільність брикетів, що є критично важливим для підвищення їхньої теплотворної здатності. Установлено, що ключовим елементом, який забезпечує зв'язування частинок, є лігнін – природний полімер, що міститься в клітинній структурі деревини. У процесі пресування за температур від 80°C він розм'якшується, переходить у пластичний стан і діє як термопластичний клей, що сприяє формуванню щільної та міцної структури [5].

Останні дослідження також зосереджено на математичному моделюванні процесу пресування для точного визначення залежності щільності та міцності від різних факторів [6; 7; 13]. Використання таких моделей дає змогу раціоналізувати роботу обладнання, мінімізувати енерговитрати та прогнозувати якість готового продукту. Наукові роботи останніх років демонструють активний пошук альтернативних джерел сировини для брикетування, що дає змогу диверсифікувати виробництво та утилізувати нові види відходів. Досліджено можливість використання відходів недеревної біомаси, таких як стебла соняшнику, солома, лушпиння та очерет, а також багатокомпонентних композитів. Наприклад, було вивчено вплив умісту деревної тирси в багатокомпонентних брикетах, і встановлено, що цей фактор має найбільший вплив на міцність кінцевого продукту. Хоча стандартні технології брикетування передбачають використання лише природного лігніну, деякі дослідження зосереджено на покращенні властивостей брикетів за рахунок додавання допоміжних речовин [7]. Вивчається можливість використання подрібнених поліетиленових відходів для підвищення теплотворної здатності та фізико-механічних властивостей брикетів із кори дуба. Це відкриває нові можливості для комплексної утилізації різних видів відходів. Окрім того, досліджується застосування природних, екологічно чистих зв'язуючих, таких як крохмаль, біомасло та суберин, що дає змогу поліпшити міцність і водостійкість брикетів, особливо під час використання сировини з низьким вмістом лігніну. Останні розробки включають у себе вдосконалення технологічних процесів. Зокрема, технологія торрефікації (термічної обробки біомаси за температури 200–320°C без доступу повітря) дає змогу отримати гідрофобне та більш енергоємне паливо, що за своїми характеристиками може конкурувати з вугіллям [8]. Таке паливо має низький вміст води (до 3%) і може зберігатися на відкритому повітрі, що значно знижує витрати на транспортування та зберігання. Окрім того, ведуться дослідження у сфері вібраційного брикетування, що дає змогу зменшити енерговитрати та оптимізувати процес пресування, а також упроваджуються методи механоактивації сировини для підвищення її зв'язуючих властивостей.



Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є дослідження процесу брикетування деревних відходів. Завдання включають аналіз фізико-хімічних механізмів процесу, вивчення впливу ключових параметрів (вологості, тиску, температури) на якість брикетів, визначення оптимальних технологічних режимів, оцінку можливостей розширення сировинної бази та надання практичних рекомендацій для вдосконалення технологій виробництва твердого біопалива.

Основна частина. Брикетування подрібнених деревних відходів є складним фізико-хімічним процесом, що ґрунтується на пластичній деформації та термопластичній активності лігноцелюлозної сировини під впливом високого тиску і температури. В основі процесу лежить здатність природного полімеру лігніну, що становить значну частку деревної біомаси, переходити в термопластичний стан під час нагрівання [9; 10]. За температури понад 80°C лігнін розм'якшується, а за подальшого підвищення тиску і температури він набуває високої пластичності, обволікаючи частинки целюлози і геміцелюлози. Це призводить до формування міжмолекулярних зв'язків і створення монолітної структури брикету, що забезпечує його високу щільність та механічну міцність без застосування синтетичних клеїв [11]. Оптимізація технологічного процесу вимагає точного контролю ключових параметрів. Важливим є показник вологості сировини, оскільки його надлишок призводить до утворення пари, що може спричинити деформацію або руйнування брикету, тоді як недостатня вологість ускладнює розм'якшення лігніну [12; 19]. Раціональний діапазон вологості, як показують численні дослідження, становить 6–10% [17; 20]. Методологія дослідження передбачала підготовку сировини, що включала її подрібнення та сушіння до необхідної вологості. Подрібнення проводилося з використанням молоткового млина для отримання фракцій із середнім розміром частинок від 3 до 8 мм. Така фракція вважається раціональною для пресування, оскільки забезпечує ефективне заповнення об'єму прес-форми і дає змогу частинкам щільно контактувати [14; 16; 18]. Висушена сировина подавалася до лабораторного гідравлічного преса, оснащеного системою контролю тиску та температури, що давало змогу точно фіксувати параметри процесу. Експерименти проводилися за однакового тиску в діапазоні від 145 до 150 МПа та температури матриці від 100 до 110°C. Цей підхід забезпечив стандартизацію умов пресування для виділення впливу саме вологості. Час витримки під тиском фіксувався на рівні 30 секунд. Було проведено серію дослідів за різної вологості сировини, за яких отримали результати, що наочно демонструють взаємозв'язок вологості та щільності брикетів, результати показано в табл. 1.

Таблиця 1

Показники досліджень

Вологість сировини тирси, %	4	6	8	10	12
Щільність брикету, т/м ³	1	1,15	1,2	1,14	1

Після пресування готові брикети вимірювали за основними показниками якості. Для визначення щільності застосовували пряме вимірювання маси та об'єму брикету та розраховували за формулою, що зв'язує щільність із масою та об'ємом:

$$\rho = \frac{V}{m}, \quad (1)$$

де ρ – щільність брикету;

m – його маса;

V – об'єм.

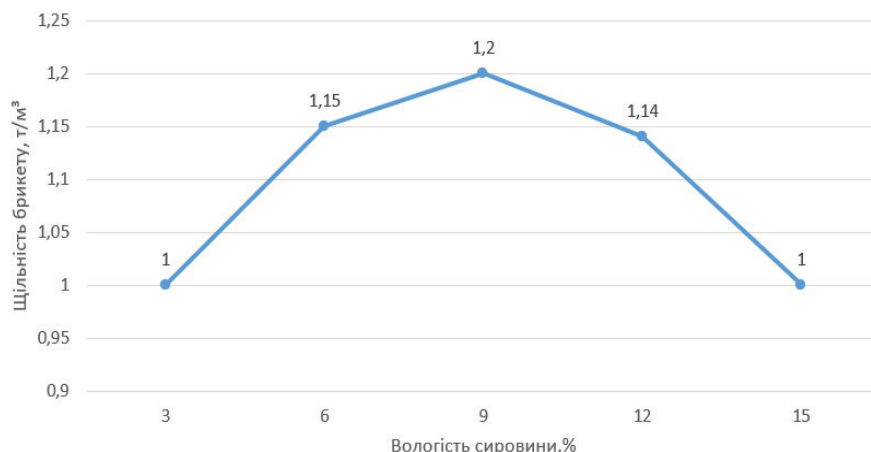


Рис. 1. Залежність щільності брикету від вологості сировини

Зокрема, дослідження довели, що залежність щільності брикетів за різної вологості має нелінійний характер (рис. 1). Із результатів, представлених у таблиці, бачимо, що за вологості 4% щільність становила 1 т/м³, за 6% – 1,15 т/м³, а за 8% – 1,2 т/м³, досягаючи максимального значення. Подальше підвищення вологості до 10% призводило до зниження щільності до 1,14 т/м³, а за 12% щільність знову опускалася до 1 т/м³. Залежність, відображена на графіку, демонструє чітке зростання щільності брикету за вологості до 8%, що свідчить про досягнення оптимальних умов ущільнення. Це пояснюється тим, що помірна кількість води діє як мастило, полегшуючи переміщення частинок і забезпечуючи їх щільне прилягання, а також сприяє рівномірному розподілу тепла для активації лігніну. Однак із підвищенням вологості понад 8% надмірна кількість пари, що утворюється під тиском, починає руйнувати структуру брикету зсередини, що призводить до зниження його щільності і міцності. Таким чином, визначення раціонального діапазону вологості є критичним етапом для створення високоякісного та енергоефективного палива.

Висновки. На основі проведеного дослідження процесу брикетування подрібнених деревних відходів можна зробити висновок, що ця технологія є високоефективним методом трансформації біомаси у цінне тверде паливо. Установлено, що ключовим для досягнення оптимальної якості продукції є точний контроль технологічних параметрів, таких як вологість сировини, тиск пресування та температура, оскільки їх взаємозв'язок має нелінійний характер. Доведено, що природний полімер лігнін відіграє вирішальну роль у формуванні міцної структури брикетів, діючи як термопластичний зв'язуючий елемент. Окрім того, застосування інноваційних підходів, зокрема торрефікації, дає змогу значно поліпшити властивості палива, підвищуючи його енергоємність та водостійкість.

Таким чином, результати дослідження є науково обґрунтованою базою для розроблення раціональних технологічних режимів, що сприятиме не лише ефективній утилізації відходів, а й зміцненню енергетичної безпеки та розвитку принципів циркулярної економіки.

Список використаних джерел

1. Полянський О.С., Д'яконов В.І., Дьяконов О.В. Комплексна оцінка енергетичних показників існуючих технологій переробки рослинних відходів у паливні брикети. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2018. Вип. 190. С. 192–202.
2. Гелетука Г.Г. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні / Г.Г. Гелетука та ін. *Промислова теплотехніка*. 2006. № 2. С. 85–93.

3. Руденко Д.Т., Єременко О.І., Василенков В.Є. Дослідження в процесі брикетування рослинної біомаси шнековим механізмом. *Інженерія природокористування*. 2020. № 3(17). С. 15–22.
4. Коваль В.Г., Петров П.С. Вплив вологості на міцність брикетів із лушпиння соняшнику. *Техніка в сільськогосподарському виробництві*. 2018. № 3(70). С. 55–61.
5. Левко С. Результати експериментальних досліджень процесу ущільнення стеблових рослинних матеріалів. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2013. № 17. С. 130–137.
6. Штефан Е.В. Використання математичного моделювання при проектуванні вузла пресування гранулятора. *Збірник наукових праць. Інформатика і моделювання*. 2010. № 31. С. 191–200.
7. Palamarchuk I., Mushtruk M., Gudzenko M., Vasylyv V., Slobodyanyuk N., Kuts A., Nychyk O., Bober A., Salavor O. Mathematical modeling, of the oil extrusion process with pre-grinding of raw materials in a twin-screw extruder. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. 14. P. 937–944.
8. Меркулов В.М., Запорожець О.І. Розроблення технології отримання паливних брикетів із деревної тріски. *Лісове та садово-паркове господарство*. 2021. № 19. С. 105–112.
9. Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М., Мотіль І.М., Гоговський Р.Р. Дослідження процесу формування паливних брикетів із рослинної сировини та визначення їхніх характеристик. *Науковий вісник НЛТУ України*. С. 138–146.
10. Осадчук М.П., Демченко І.В. Експериментальні дослідження процесу брикетування рослинних відходів. *Проблеми енергетики та енергоефективності*. 2017. № 1(24). С. 88–94.
11. Лук'янець В.О., Субота С.В. Вплив параметрів ущільнення рослинної біомаси на показники якості біопаливних брикетів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2014. Вип. 99. Т. 2. С. 103–113.
12. Ткачук Р.А., Заєць Л.М. Технологія виробництва біопалива з відходів сільського господарства. *Аграрна наука та виробництво*. 2017. № 1(18). С. 78–83.
13. Панасюк В.М., Смірнов А.Г. Моделювання процесів ущільнення біомаси в шнекових пресах. *Вісник аграрної науки*. 2018. № 12. С. 60–65.
14. Семірменко Ю.І., Семірменко С.Л. Дослідження залежності щільності брикетів із соломи озимої пшениці від її характеристик. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2010. Вип. 1(21). С. 86–90.
15. Комар А.С., Болтянський Б.В. Конструктивно-технологічне вдосконалення вальцевих грануляторів із плоскою матрицею. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2023. Вип. 13. Т. 1. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-11.
16. Манзій С.О. Порівняльні характеристики гранульованого та брикетованого біопалива. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2010. Вип. 20.3. С. 88–90.
17. Корінчук Д.М. Дослідження впливу технологічних факторів брикетування та параметрів компаундування на якісні показники композиційного торфодеревинного палива. *Відновлювана енергетика*. 2009. № 1. С. 63–70.
18. Штефан Є.В. Експериментальний метод дослідження реологічних властивостей органічних матеріалів – відходів зернової промисловості. *Наукові праці НУХТ*. 2008. № 25. С. 106–108.
19. Blagov D.A., Gizatov A.Y., Smakuyev D.R., Kosilov V.I., Pogodaev V.A., Tamaev S.A. Overview of feed granulation technology and technical means for its implementation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. 613(1): 012018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012018>.
20. Muramatsu K., Massuquetto A., Dahlke F., Maiorka A. Factors that affect pellet quality: a review. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2015. 9(2):717–722. DOI: <https://doi.org/10.17265/2161-6256/2015.09.002>.

Стаття надійшла до редакції 22.09.2025

Стаття прийнята 06.10.2025

Статтю опубліковано 25.11.2025



**B. Boltianskyi***Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

RESEARCH ON THE PROCESS OF MANUFACTURING FUEL BRICKS FROM BIOMASS

Summary

This article is devoted to a thorough study of the physicochemical patterns of the briquetting process of crushed wood waste. The work comprehensively analyzes the key role of the natural polymer lignin, which, under the influence of high pressure (145–150 MPa) and elevated temperature (100–110°C), transitions to a plastic state, thereby ensuring the formation of a strong monolithic briquette structure. This thermoplastic transition of lignin creates irreversible intermolecular bonds, which give the finished product the necessary water resistance and mechanical strength. The methodological basis of the study was based on a series of experiments with changes in the moisture content of raw materials in the range from 4% to 12% under constant pressing conditions. The results confirmed that the dependence of briquette density on moisture content is distinctly nonlinear. In particular, it was clearly established that the optimal moisture content of the raw material is 8%, at which the maximum density (1,2 t/m³) is achieved, which directly correlates with the calorific value. Deviations from this optimal value (both in the direction of increasing and decreasing moisture content) lead to a predictable decrease in briquette density due to the formation of excessive steam, which causes destruction of the structure, or, conversely, insufficient softening of lignin, which makes proper consolidation impossible.

This convincingly proves that rational preparation of raw materials is a critically important stage in briquetting, as it affects both the quality and the specific energy consumption of the process. Thus, determining the optimal moisture range is a critically important step in creating high-quality and energy-efficient fuel that can meet international standards. The successful implementation of these scientifically based results in industry will significantly optimize production processes, reducing production costs, which is important for effective waste disposal and the development of circular economy principles.

Keywords: briquetting, wood waste, biofuel, lignin, moisture content, pressure, density, thermo mechanical activation, physicochemical properties, torrefaction, energy security, circular economy.