

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-9>

УДК 662.8.055

В. П. Кувачов, д-р. техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-5762-256X

О. О. Червоткіна, асистент

ORCID: 0000-0002-6814-0566

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: volodymyr.kuvachov@tsatu.edu.ua

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ДІАПАЗОНУ ВОЛОГОСТІ СИРОВИНИ ДЛЯ БРИКЕТУВАННЯ

Анотація. У статті досліджено вплив вологості сировини на фізичну щільність паливних брикетів, отриманих методом високотемпературного пресування з різних видів біомаси: деревної тирси, соломи та лушпиння соняшнику. Метою роботи було експериментальне встановлення критичного раціонального діапазону вологи для максимізації ступеня ущільнення. Експерименти проводили з п'ятьма рівнями вологості – від 4 % до 12 % – при сталих параметрах пресування. Аналіз результатів підтвердив нелінійний характер залежності з вираженим екстремумом. Найвища щільність була зафіксована при вологості 8 % для всіх зразків, досягаючи $\rho = 1,25 \text{ т/м}^3$ для тирси.

Оптимум пояснюється ідеальною дією вологи як гідротермального пластифікатора для активації лігніну. Установлено, що відхилення від цього діапазону призводить до значного зниження щільності.

Ключові слова: брикети, сировина, брикетування, лігнін, вологість, щільність, пароутворення, температура.

Постановка проблеми. Дедалі більший світовий попит на відновлювані джерела енергії зумовлює необхідність підвищення ефективності та якості біопалива, зокрема паливних брикетів, виготовлених з агробіомаси та деревної тирси [1; 3]. Якість кінцевого продукту, що визначається його фізичною щільністю та механічною міцністю, безпосередньо впливає на теплотворну здатність і логістичні витрати. Процес брикетування, який базується на термопластичній активації лігніну, є складним фізико-хімічним явищем, що критично залежить від технологічних параметрів [2].

Незважаючи на широке впровадження технологій брикетування, залишається недостатньо вивченим і кількісно не обґрунтованим універсальний вплив вологості сировини на кінцеву щільність продукту за сталого режиму пресування для різних видів біомаси. У виробничих умовах часто спостерігаються значні коливання щільності брикетів при зміні джерела сировини (перехід від деревної тирси до соломи чи лушпиння), що призводить до нестабільності якості продукції та економічних втрат [4]. Дійсні наукові дані вказують на наявність екстремуму в залежності щільності від вологості, проте точне кількісне визначення оптимального діапазону для одночасного використання деревної, соломистої та олійної сировини є необхідним.

Так, проблема полягає у відсутності чіткого кількісного обґрунтування раціонального вмісту вологи для уніфікованого процесу пресування різномірної біомаси, що перешкоджає максимальній термопластичній консолідації лігніну й призводить до зниження кінцевої щільності через неефективну пластифікацію (за низької вологості) або пружну післядію (за високої вологості). Вирішення цієї проблеми має пряме практичне значення для підвищення ефективності виробництва та конкурентоспроможності біопалива.

Аналіз останніх досліджень. Питання виготовлення високоякісних паливних брикетів є центральним для сучасної біоенергетики, що вимагає глибокого розуміння термогідродинамічних, реологічних та механічних процесів ущільнення. У науковій літературі підтверджено,



що ключовим механізмом, який забезпечує монолітність брикетів без зовнішніх зв'язувальних агентів, є термопластична активація лігніну. Установлено, що лігнін, як природний полімер, переходить у в'язку текучий стан за температури, що перевищує його температуру склування. Дослідження у сфері фізики полімерів та біомаси демонструють, що для абсолютно сухої деревини температура склування є високою, проте в умовах пресування критично важливу роль відіграє вода, яка виступає як високоефективний пластифікатор [5]. Наявність вологи, згідно з гідротермальною теорією, істотно знижує необхідну температуру активації лігніну, даючи йому змогу набувати достатньої пластичності для забезпечення адгезії та консолідації частинок уже за помірних температур 100–110 °С, за умови високого тиску [6; 7]. Оптимальна вологість критично необхідна для мінімізації енерговитрат на нагрівання та максимізації ефективності міжчасткового зв'язування через формування водневих та вандерваальсових сил. Установлено, що ефективність цього зв'язування безпосередньо корелює з кінцевою теплотворною здатністю брикету [8; 9].

Аналіз комплексних досліджень щодо ущільнення різних видів біомаси (деревина, солома, лушпиння) беззаперечно доводить, що залежність кінцевої щільності брикету від початкової вологості сировини має екстремальний характер, з чітко вираженим оптимальним вмістом вологи у вузькому діапазоні. Технологічні дослідження застерігають, що за низької вологості (менш ніж 5 %) матеріал зберігає високу внутрішню жорсткість і крихкість [10; 11]. Недостатність вологи для повноцінної пластифікації лігніну та геміцелюлозу вимагає застосування непропорційно високого тиску для досягнення ущільнення, що є економічно недоцільним і підвищує зношеність обладнання. Це веде до неефективної пластичної податливості та формування в брикеті великої кількості мікротріщин і внутрішніх порожнин, знижуючи кінцеву його щільність. Натомість у діапазоні високої вологості (понад 10 %) фіксується дія руйнівного механізму, пов'язаного з інтенсивним пароутворенням. Як зазначається у працях з термодинаміки пресування та механіки твердих тіл, надлишок вологи під впливом ізохоричного стиснення і температури миттєво перетворюється на пару, яка створює високий внутрішній тиск у мікропорожнинах [12]. Після зняття зовнішнього пресувального тиску внутрішній тиск пари спричиняє пружну післядію (значне розширення об'єму) та руйнування структури брикету. Це призводить до різкого зниження кінцевої щільності та критичної втрати механічної міцності. Слід зазначити, що швидкість охолодження брикету також впливає на ступінь прояву пружної післядії за надлишкової вологості. Авторитетні наукові роботи сходяться на тому, що універсальний оптимальний діапазон вологості перебуває в межах 6–10 %, оскільки він забезпечує максимальну реологічну податливість сировини за мінімальних ризиків пароутворення [13; 14]. При цьому підкреслюється, що точне значення вологості є функцією хімічного складу сировини та її фізичної структури. Різниця в хімічному складі, зокрема вміст лігніну та мінеральних домішок, може незначно зміщувати раціональний діапазон. Визначення єдиного універсального оптимуму вологості для різних видів біомаси є важливим кроком для стандартизації та уніфікації технологічних процесів на виробництвах, що використовують змішану або змінну сировинну базу, забезпечуючи стабільність якості продукції. Оптимізація вологості на етапі підготовки сировини є найбільш економічно виправданим заходом для підвищення ефективності виробництва. Контроль цього параметра дає змогу знизити експлуатаційні витрати на пресування та сушіння [15; 16].

Формулювання цілей статті. Метою наукової роботи є експериментальне встановлення раціонального діапазону вологості сировини (тирси, соломи та лушпиння соняшнику) для забезпечення максимальної фізичної щільності паливних брикетів, отриманих методом високотемпературного пресування за сталих технологічних режимів. Для досягнення цієї мети необхідно дослідити нелінійну залежність щільності брикетів від вологості сировини в діа-

пазоні від 4 % до 12 % для трьох різних видів біомаси, що дасть змогу охопити як умови недостатньої пластифікації, так і надмірного пароутворення. Визначити критичний оптимальний уміст вологи для кожного типу сировини, за якого досягається найвищий ступінь ущільнення.

Основна частина. Метою дослідження є кількісне встановлення впливу вологості сировини на фізичну щільність паливних брикетів, отриманих з різних видів біомаси: соломи, деревної тирси та лушпиння соняшнику [17; 18]. Для забезпечення порівнянності результатів експерименти проводили за сталих технологічних параметрів пресування, включно з фіксованим тиском та температурою (що відповідають умовам високотемпературної активації лігніну та інших природних зв'язувальних компонентів). Сировина була підготовлена шляхом подрібнення до оптимальної фракції в діапазоні 3–6 мм, що мінімізує вплив гранулометричного складу на процес ущільнення [19; 20]. Досліджували п'ять ключових рівнів вологості сировини 4 %, 6 %, 8 %, 10 %, 12 %, які охоплюють діапазон від критично низької до надмірної вологості. У таблиці 1 представлено результати досліджень впливу вологості сировини на щільність брикетів із трьох різних видів сировини за сталого тиску та температури пресування.

Таблиця 1

Результати досліджень

Вологість сировини, %	4	6	8	10	12
Щільність брикетів з соломи, т/м ³	1,05	1,15	1,2	1	0,9
Щільність брикетів з тирси, т/м ³	1	1,18	1,25	1,12	0,95
Щільність брикетів з лушпиння соняшнику, т/м ³	1	1,15	1,19	1,1	0,9

Графічна інтерпретація отриманих даних відображена на рисунку 1.

Аналіз отриманих результатів, візуалізованих на графіку (рис. 1), підтверджує нелінійний характер залежності щільності брикетів від вологості сировини для всіх трьох видів біомаси, що має чітко виражений оптимум.

Для деревної тирси максимальна щільність 1,25 т/м³ досягнута за вологості 8 %. Це пояснюється тим, що за цієї вологості вода діє як гідротермальний пластифікатор, ефективно знижуючи температуру розм'якшення лігніну та сприяючи його переходу у в'язко текучий стан. Лігнін, своєю чергою, забезпечує формування міцних адгезійних зв'язків. За зниження вологості до 4 % щільність зменшується до 1,00 т/м³, що свідчить про недостатню пластичність матеріалу. Збільшення вологості до 12 % призводить до падіння щільності до 0,95 т/м³ через надмірне пароутворення в умовах пресування, що спричиняє пружну післядію та розтріскування брикету після зняття тиску.

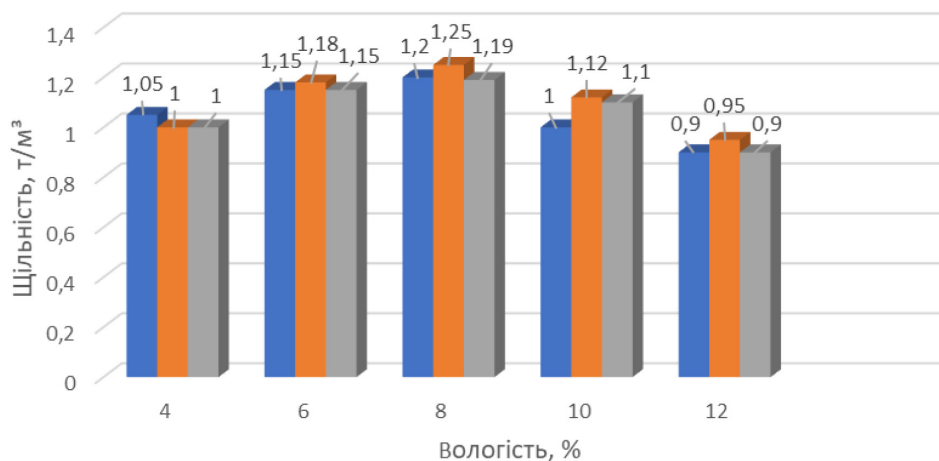


Рис. 1. Графік залежності щільності брикету від вологості для різних видів сировини



Схожа закономірність спостерігається і для соломи, де максимальна щільність $1,20 \text{ т/м}^3$ також фіксується за вологості 8 %. Однак у випадку соломи, яка має інший лігноцелюлозний склад (вищий уміст кремнезему та нижчий уміст лігніну), діапазон робочої вологості є більш чутливим. Збільшення вмісту води в сировині до 10 % спричиняє значне зниження кінцевої фізичної щільності брикетів. Цей факт свідчить про підвищену чутливість такого виду біомаси до ефекту пружної післядії, викликаного надмірним внутрішнім тиском пари в умовах високотемпературного пресування.

Для лушпиння соняшнику, сировини, багаті на олії та менш структуровані волокна, оптимальне значення щільності $\rho = 1,19 \text{ т/м}^3$ також перебуває за вологості 8 %. Хоча абсолютні значення кінцевої щільності для лушпиння соняшнику є дещо нижчими порівняно з деревною тирсою, що зумовлено відмінностями в хімічному складі (зокрема, вмістом лігніну та олійних компонентів), загальна тенденція залежності від вологості залишається сталою. Зокрема, надмірно суха сировина з вологістю 4 % демонструє низьку пластичність, що обмежує ущільнення до $\rho = 1,0 \text{ т/м}^3$, тоді як надмірно волога сировина (12 %) фіксує падіння щільності до $\rho = 0,9 \text{ т/м}^3$ внаслідок негативного впливу внутрішнього тиску пари на структурну монолітність брикетів.

Так, експериментально підтверджено, що для забезпечення максимального ущільнення паливних брикетів з різних видів агробіомаси та деревної тирси вологість сировини має бути суворо контрольована та підтримуватися в оптимальному діапазоні 6–8 %. Відхилення від цього діапазону, незалежно від типу сировини, призводить до значного зниження кінцевої щільності, що негативно впливає на теплотворну здатність та механічну стабільність продукту.

Висновки. За результатами проведеного експериментального дослідження встановлено, що вміст води в сировині чинить критичний вплив на фізичну щільність паливних брикетів, виготовлених із деревної тирси, соломи та лушпиння соняшнику, що безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту та технологічну ефективність процесу брикетування. Дослідження експериментально підтвердило, що для всіх трьох видів біомаси є чітко виражений оптимальний діапазон вологості 6–8 %. Найвища щільність досягнута за вологості 8 %: для тирси $\rho = 1,25 \text{ т/м}^3$, для соломи $\rho = 1,20 \text{ т/м}^3$, а для лушпиння соняшнику $\rho = 1,19 \text{ т/м}^3$. Установлено, що такий рівень вологості забезпечує ідеальні умови для термопластичної активації лігніну та максимізації пластичної податливості сировини, що є ключовою передумовою для формування міцної та високо щільної структури брикету. При цьому низька вологість 4 % призводить до зниження щільності через недостатню пластифікацію матеріалу та його високу внутрішню жорсткість. Водночас висока вологість 12 % спричиняє значне падіння щільності через інтенсивне пароутворення в умовах пресування, що створює внутрішній тиск і викликає пружну післядію (розширення) брикетів після виходу з матриці. Отримані кількісні дані дають змогу сформулювати чіткі технологічні рекомендації щодо необхідності суворого контролю вологості сировини на етапі підготовки. Підтримання вологості в діапазоні 6–8 % є ключовим заходом для уніфікації процесів при використанні змішаної сировинної бази, що дає змогу максимізувати щільність, механічну стійкість та енергетичну ефективність паливних брикетів.

Список використаних джерел

1. Гелетука Г. Г. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні. *Пром. тепло-техніка*. 2006. № 2. С. 85–93.
2. Левко С. Результати експериментальних досліджень процесу ущільнення стеблових рослинних матеріалів. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. : Агроінженерні дослідження*. Львів 2013. № 17. С. 130–137.
3. Хіврич О. Б., Квака В. М., на ін. Енергетичні рослини як альтернатива традиційним видам палива. *Агробіологія*. 2011. Вип. 6. С. 153–157.



4. Коваль В. Г., Петров П. С. Вплив вологості на міцність брикетів з лущиння соняшнику. *Техніка в сільськогосподарському виробництві*. 2018. Вип. 3(70). С. 55–61.
5. Кіндзера Д. П., Атаманюк В. М. та ін. Дослідження процесу формування паливних брикетів із рослинної сировини та визначення їх характеристик. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. С. 138–146.
6. Семірменко Ю. І., Семірменко С. Л. Дослідження залежності щільності брикетів із соломи озимої пшениці від її характеристик. *Вісник Сумського національного аграрного університету : наук. журнал*. Суми : Вид-во СНАУ. 2010. Вип. 1(21). С. 86–90. 13.
7. Говоруха В. Б., Луц П. М., Кисельов О. В. Фізико-математична модель процесу пресування паливних брикетів з рослинних матеріалів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. Вип. 3 (110). С. 67–74.
8. Штефан Е. В. Визначення експлуатаційних навантажень в елементах обладнання при виробництві паливних пелет. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харків. 2012. № 59. С. 147–150.
9. Калетнік Г. М., Пришляк В. М.. Біопалива: ефективність їх виробництва та споживання в АПК України : *Навчальний посібник*. Київ : Аграрна наука. 2010. С. 327.
10. Ткачук Р. А., Заєць Л. М. Технологія виробництва біопалива з відходів сільського господарства. *Аграрна наука та виробництво*. 2017. Вип. 1(18), С. 78–83.
11. Garrido M. A., Conesa J. A., M. D. Garcia. Characterization and Production of Fuel Briquettes Made from Biomass and Plastic Wastes. *Energies*. 2017. Vol. 10. Issue 7. P. 850.
12. Лук'янець В. О. та ін. Вплив параметрів ущільнення рослинної біомаси на показники якості біопаливних брикетів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2014. Вип. 99. Т. 2. С. 103–113.
13. Сарана В. В. Багатокритеріальна оцінка сучасного обладнання для виготовлення паливних гранул і брикетів з відходів переробки сільськогосподарських культур і деревини. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія техніка та енергетика АПК*. Київ, 2010. Вип. 144, Ч. 4. С. 190–197.
14. Атаманюк В. М. Сушіння подрібнених стебел соняшника в умовах фільтрації теплоносія. *Сучасні технології та обладнання харчових виробництв* : збірник тез доп. Міжнар. наук.-техн. конф. Тернопіль, 2011. С. 188.
15. Штефан Е. В. Експериментальний метод дослідження реологічних властивостей органічних матеріалів-відходів зернової промисловості. *Наукові праці НУХТ*. 2008. № 25, 42. С. 106–108.
16. Тверде біопаливо: технологічні вимоги, властивості компонентів та технологія виробництва. *Електронний ресурс*. Газета «Агробізнес сьогодні». № 19. С. 290.
17. Діденко М. М., Кухаренко П. М. Дослідження фізико-механічних властивостей брикетів з соломи пшениці. *Наукові праці НУХТ*. 2019. Вип. 25(3). С. 115–121.
18. Гелетука Г. Г., Железна Т. А. та ін. Обґрунтування типових проектів виробництва і споживання паливних брикетів з агробіомаси в Україні. *Науковий вісник НУБіП України. Серія : Техніка та енергетика АПК*. Київ : ВЦ НУБіП України, 2018. Вип. 282. С. 173–181.
19. Бурдяк В. М. Брикетування відходів деревини та сільського господарства. *Технологія та обладнання*. Вінниця : ВНТУ. 2018. С. 120–135.
20. Червоткіна О. О., Тарасенко В. Г. Аналіз умов залучення сировини до зони стиснення та обґрунтування довжини каналу пресування. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 360–363.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2025

Стаття прийнята 10.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025





V. Kuvachov, O. Chervotkina
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

EXPERIMENTAL STUDY OF THE RATIONAL MOISTURE RANGE OF RAW MATERIALS FOR BRICKING.

Summary

The article investigates the influence of raw material moisture content on the physical density of fuel briquettes obtained by high-temperature pressing from various types of biomass: wood sawdust, straw, and sunflower husks. The main objective of the study was to experimentally establish the critical optimal moisture range required to maximize the degree of material compaction under constant technological conditions.

The experimental part included testing five clearly defined moisture levels, ranging from 4 % to 12 %, with strictly fixed pressing parameters. Analysis of the results confirmed a pronounced nonlinear dependence of density on moisture content, characterized by a clear extreme. The highest density was consistently recorded at 8 % moisture content for all samples, reaching a peak value of $\rho = 1.25 \text{ t/m}^3$ for wood sawdust.

The determined optimum is theoretically explained by the ideal function of water as a hydrothermal plasticizer. At 8 % moisture content, water effectively lowers the glass transition temperature of lignin, promoting its transition to a viscous-plastic state. This ensures optimal particle deformation and the formation of strong cohesive and adhesive bonds, which guarantees the monolithic nature of the product.

The study found that deviations from this critical range significantly impair the compaction process. At low levels, insufficient plasticization is observed, leading to high internal stiffness and incomplete filling of microvoids under pressure. Conversely, at high moisture levels, excess water generates high internal vapor pressure during pressing. After the external load is removed, this pressure causes elastic aftereffect and structural destruction, leading to a sharp decrease in final density and mechanical stability.

The quantitative data obtained allow us to formulate practical, scientifically based recommendations aimed at standardizing and unifying the processes of raw material preparation in biofuel production, ensuring maximum product quality and energy efficiency regardless of the initial type of biomass.

Keywords: briquettes, raw materials, briquetting, lignin, moisture content, density, steam generation, temperature.