

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-18>

УДК 662.8.055

В. П. Кувачов, д-р техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-5762-256X

В. Ф. Ялпачик, д-р техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-0349-2448

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ ТА ТЕМПЕРАТУРИ НА ЩІЛЬНІСТЬ БРИКЕТІВ ІЗ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ СИРОВИНИ

*Анотація.* Використання брикетів із соломи є екологічно виправданою та економічно доцільною альтернативою викопним видам палива, оскільки цей процес є вуглецево нейтральним і сприяє утилізації аграрних відходів. Метою роботи є кількісне обґрунтування впливу вологості сировини та температури пресування на щільність брикетів. Основна частина дослідження полягала в експериментальному пресуванні подрібненої соломи за сталого тиску в температурних режимах до 90°C та за варіації вологості 4–12%. Аналіз результатів підтвердив нелінійну залежність щільності від вологості. Зростання щільності спостерігалось до раціональної вологості 8%, за якої була досягнута найвища щільність (близько 1,2 т/м<sup>3</sup>) за температури 90°C. Ця комбінація забезпечує достатню термічну активацію лігніну та його пластифікацію. Низька вологість недостатня для каталізу, тоді як надлишкова (12%) за високої температури спричиняє деструкцію брикету внутрішнім тиском пари, що різко знижує щільність. Хоча високий тиск сприяє ущільненню, його зростання після точки насичення економічно недоцільне через збільшення питомої енергоемності. Отримані результати дають змогу сформулювати раціональні технологічні рекомендації для підвищення якості та конкурентоспроможності паливних брикетів із соломи.

*Ключові слова:* брикети, брикетування, вологість, матриця, щільність, температура.

*Постановка проблеми.* Метою брикетування у сфері енергетичного виробництва є ущільнення великих обсягів подрібненої сировини в однорідні тверді форми (брикети) з фізико-механічними властивостями, придатними для ефективного використання в теплогенераційних установках [1]. Традиційно пресування матеріалів застосовується для зменшення об'єму сипучих відходів, полегшення їх перевезення та зберігання, а також для підвищення енергетичної щільності кінцевого продукту. Сьогодні зростає стратегічна важливість твердого біопалива, виготовленого з різних видів рослинної сировини та відходів, – від деревинних залишків (тирси, кори) до сільськогосподарських відходів (лушпиння, соломи) [2]. Відомо, що процес брикетування полягає у прикладенні високого тиску до сипучої сировини за допомогою прес-форм або екструдерів для індукування пластичної деформації та активації природних зв'язуючого (лігніну) [3; 4]. Попередня підготовка сипучої рослинної сировини, включаючи регулювання вологості та термічну обробку, є необхідною умовою для успішної консолідації матеріалу [5; 6]. Операції брикетування здійснюються у спеціалізованих пресах, які використовують ударний, шнековий або гідравлічний принципи дії.

Однак, незважаючи на широке впровадження операцій брикетування у виробничі процеси, тривають науково-технічні дослідження, спрямовані на встановлення кількісних закономірностей процесу ущільнення рослинної сировини. Головною метою цих досліджень є вдосконалення технології і технічних засобів для гарантованого підвищення якості та конкурентоспроможності паливних брикетів на міжнародному ринку.

*Аналіз останніх досліджень.* Загальносвітова тенденція до заміщення викопного палива стимулює розвиток технологій пресування біомаси [7; 8]. До такого типу високотехноло-



гічного палива належать паливні брикети та пелети, які являють собою спресовані циліндричні відходи лісової або сільськогосподарської промисловості, що відповідають високим екологічним та енергетичним вимогам [9; 10]. Екологічність цих продуктів підтверджується самим процесом їх виготовлення, де подрібнені відходи, такі як солома, піддаються пресуванню до високої щільності. Солома є економічно та екологічно вигідною альтернативою традиційним деревним відходам для пресування паливних гранул та брикетів [11; 12]. У регіонах з обмеженими лісовими ресурсами, особливо в аграрних країнах, таких як Україна, сільськогосподарські відходи (солома зернових культур, лушпиння соняшника) є значним і найбільш дешевим відновлювальним джерелом енергії. Ця привабливість посилюється питомим складом відходів. Наприклад, на кожну тонну виробленої пшениці припадає близько 1,7 т соломи та лушпиння, а для кукурудзи ця частка сягає 2,0 т стебла та листя.

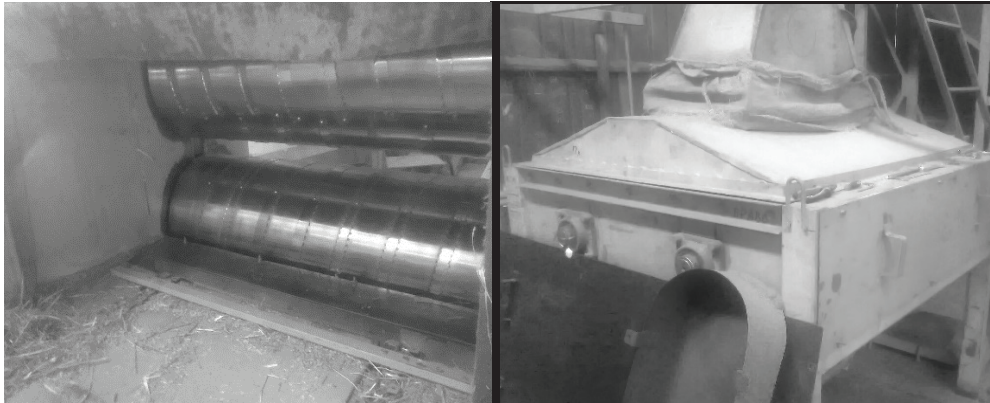
Солома вирізняється високими енергетичними характеристиками, які є конкурентними порівняно з деревиною. Теплотворна здатність пшеничної соломи становить 17–18 МДж/кг [13; 14]. Для порівняння: середня теплотворна здатність деревини становить 17,2–19,0 МДж/кг [15]. Слід відзначити, що солома як сировина має ключові відмінності від традиційних деревних відходів, які створюють специфічні технологічні виклики. Солома відрізняється більшим умістом летких речовин та має значно нижчу насипну щільність, що вимагає більшого тиску під час пресування [16]. Окрім того, час горіння брикетів із соломи, як правило, є більшим порівняно з брикетами з чистих деревних відходів, що є перевагою для кінцевого споживача. Ці відмінності підкреслюють необхідність оптимізації параметрів пресування (температури, вологості та тиску), які є предметом постійних досліджень.

Слід підкреслити, що за своїми основними параметрами характеристики брикетів із соломи відповідають високим вимогам, установленим для традиційних паливних брикетів із деревних відходів (тирси), включаючи високу теплоту згоряння та низький уміст сірки. Єдиним суттєвим винятком є зольність: у брикетів із соломи вона зазвичай має вищий показник, аніж у брикетів із тирси [17]. Незважаючи на цей фактор, що вимагає використання котлів зі спеціалізованими системами золовидалення, за своїми загальними показниками солома є вельми перспективним джерелом енергії, особливо з огляду на її доступність, великі обсяги та низьку собівартість як вихідної сировини.

Найбільш привабливими ринками збуту для брикетів із соломи є країни Європейського Союзу, де використання цього виду біопалива має давню традицію і підтримується державними програмами [18]. Європейський досвід підтверджує економічну доцільність переробки аграрних відходів у високоякісне паливо. Ми раді відзначити, що й на внутрішньому ринку України цей ефективний та екологічний вид палива стає дедалі більш затребуваним як серед промислових, так і серед приватних споживачів. Виробництво брикетів із соломи є відносно новим бізнес-напрямом для України [19; 20]. Хоча навіть у Європі кількість таких виробників невелика, але наявний світовий досвід є суттєвим. Проаналізувавши ринок, бачимо, що виготовлення брикетів із соломи є вигідним та стратегічно важливим. Цей напрям забезпечує Україні додаткову енергетичну незалежність, сприяє раціональному використанню аграрних відходів та створює додатковий прибуток у сільськогосподарському секторі.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою наукової роботи є дослідження та кількісне обґрунтування впливу критичних технологічних параметрів (вологості сировини та температури пресування) на процес виготовлення паливних брикетів із соломи. Для досягнення цієї мети необхідно експериментально встановити залежності щільності від варіацій зазначених параметрів. Кінцевий результат передбачає розроблення раціональних технологічних рекомендацій, які забезпечать максимальну якість продукту за мінімальних енергетичних витрат, підвищуючи конкурентоспроможність галузі.

*Основна частина.* Основну частину дослідження присвячено експериментальному обґрунтуванню та кількісному визначенню взаємозв'язків між основними технологічними параметрами процесу брикетування соломи та якісними показниками кінцевого продукту. Як вихідну сировину використовуємо подрібнену солому зернових культур, яка проходить етапи подрібнення та коригування вологості для забезпечення контрольованих умов експерименту. Дослідження проводиться на спеціалізованому пресовому обладнанні. Подрібнення соломи виконували за допомогою спеціальних дробарок у два етапи (рис. 1).



а

б

**Рис. 1. Подрібнення соломи: а) дробарка грубого ступеня подрібнення; б) дробарка мілкового ступеня подрібнення**

Далі подрібнена сировина просувалася до вологості 4%, 8%, 12% за допомогою барабанної сушарки (рис. 2). Барабанна сушарка забезпечувала рівномірне зниження вологості, що є критично важливим для уникнення локальних перегрівів та збереження структури лігніну. Діапазон вологості 4–12% був вибраний не випадково, оскільки він охоплює нижню межу (де пластифікація лігніну ускладнена) та верхню межу (де починається інтенсивне пароутворення). Такий контроль необхідний для точного визначення раціональної вологості для брикетування.



**Рис. 2. Барабанна сушарка соломи**

Ключовим напрямом роботи є визначення впливу вологості сировини та температури пресування на щільність отриманого брикету. Установлення раціонального вмісту вологи є кри-



тичним, оскільки її дефіцит перешкоджає необхідній пластифікації природних зв'язуючих компонентів (лігніну та геміцелюлози), тоді як надлишок за високих температур призводить до зростання внутрішнього тиску, спричиняючи деструкцію брикету. Для кількісної оцінки щільності ( $\rho$ ) використовуємо класичну залежність, яка виражається як відношення маси ( $m$ ) до об'єму ( $V$ ) брикету:

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

У табл. 1 представлено результати досліджень впливу вологості та температури на щільність брикетів із соломи за сталого тиску пресування.

Таблиця 1

## Результати досліджень

Температура матриці, °C	50			70			90		
Щільність брикету, т/м <sup>3</sup>	0,8	0,9	0,7	1	1,1	0,7	1,1	1,2	0,9
Вологість сировини, %	4	8	12	4	8	12	4	8	12

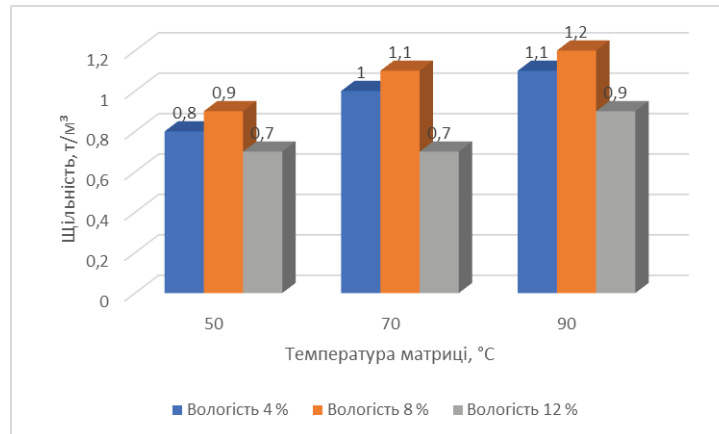
Аналіз даних, представлених у табл. 1, є ключовим етапом для визначення раціональних технологічних параметрів виробництва брикетів із соломи. Ці дані демонструють складну взаємодію між температурою матриці та вологістю сировини на кінцеву щільність брикету. Дослідження чітко підтверджує залежність щільності брикету від вологості сировини. У всіх досліджуваних температурних режимах (50°C, 70°C, 90°C) простежується чітка тенденція зростання щільності за вологості сировини від 4% до 8% із подальшим її різким падінням за досягнення 12%.

За вологості сировини 4% за всіх температурних режимів щільність брикету є помірною (0,8–1,1 т/м<sup>3</sup>). Незважаючи на ефективне механічне ущільнення, недостатній уміст вологи перешкоджає повноцінній пластифікації лігніну. Відсутність води як гідротермального катализатора не дає змоги лігніну ефективно перейти у в'язко текучий стан, що знижує адгезійне зчеплення частинок. Зі збільшенням вологості до 8% цей рівень вологи є раціональним, щільність готового продукту зростає. У поєднанні з температурою він забезпечує необхідну гідротермальну обробку матеріалу, що значно підвищує його пластичність. Максимальна щільність 1,2 т/м<sup>3</sup> була досягнута саме за вологості сировини 8% (за 90°C). Але вже під час пресування сировини з вологістю 12% спостерігається різке падіння щільності до 0,70–0,90 т/м<sup>3</sup>. Це пояснюється тим, що висока температура матриці (80–90°C) перетворює надлишкову вологу на пару, яка створює внутрішній тиск усередині брикету. Цей тиск, вивільняючись після зняття зовнішнього тиску преса, руйнує шойно сформовану і не охолоджену структуру продукту, спричиняючи деструкцію та розбухання.

Температура матриці є головним чинником термічної активації лігніну, що забезпечує міцність брикету.

Із графіку, представленого на рис. 3, бачимо, що під час пресування рослинної сировини як вологість, так і температура мають великий вплив на щільність готового продукту. Зі збільшенням температури від 50°C до 90°C спостерігається поступове збільшення щільності. Низькі температури є недостатніми для повної активації лігніну та не забезпечують достатнє пом'якшення матеріалу для механічного ущільнення. Але вже за температури 90°C спостерігається досягнення максимальної щільності (1,2 т/м<sup>3</sup>). За такої температури лігнін достатньо пластифікується, сприяючи утворенню міцної структури. Однак саме за температури 90°C ризик деструкції від надлишкової вологи є найвищим, оскільки за такої температури волога частково починає перетворюватися на пару.





**Рис. 3. Графік залежності щільності брикету від температури матриці за різної вологості сировини**

*Висновки.* За результатами проведеного експериментального дослідження та кількісного аналізу взаємозв'язків між ключовими технологічними параметрами процесу брикетування соломи сформульовано низку висновків, які мають безпосереднє практичне значення для оптимізації виробництва твердого біопалива. Наше дослідження чітко підтвердило, що щільність брикету має нелінійну залежність від вологості сировини та температури пресування, демонструючи необхідність пошуку вузького раціонального діапазону. Експериментально встановлено, що найвищий показник щільності було досягнуто за вологості сировини 8% та температури матриці 90°C. Ця комбінація виявилася раціональною, оскільки вона забезпечує достатню термічну активацію природних зв'язуючих компонентів, зокрема лігніну. Водночас обґрунтовано критичні пороги вологості: дефіцит вологи (4%) недостатній для гідротермального каталізу, тоді як її надлишок (12%) за високої температури спричиняє деструкцію брикету внутрішнім тиском пари, що різко знижує кінцеву щільність. Окрім того, визначено, що температура 90°C є раціональною для максимальної пластифікації лігніну. Отримані кількісні залежності створюють науково обґрунтовану основу для розроблення технологічних рекомендацій, які гарантують високу якість паливних брикетів із соломи та підвищують їхню конкурентоспроможність на міжнародному ринку.

#### Список використаних джерел

1. Аналіз можливостей виробництва і споживання паливних брикетів із біомаси сільськогосподарського походження в Україні. Частина 2 / Г.Г. Гелетука та ін. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. Т. 41. № 1. С. 67–73.
2. Енергетичні рослини як альтернатива традиційним видам палива / О.Б. Хіврич та ін. *Агробіологія*. 2011. Вип. 6. С. 153–157.
3. Семірненко С.Л. Дослідження залежності щільності брикетів із соломи озимої пшениці від деяких факторів. *Системотехніка і технології лісового комплексу*. 2011. Вип. 111. С. 112–120.
4. Штефан Є.В. Визначення конструктивно-технологічних параметрів процесів переробки харчових матеріалів холодною екструзією. *Комбикормова промисловість України*. 2006. № 5(18). С. 16–20.
5. Ярмолюк М.В., Романюк І.П. Дослідження процесу брикетування біомаси під високим тиском. *Промислова теплотехніка*. 2019. № 41(2). С. 70–76.
6. Кіндзера Д.П., Агаманюк В.М., Госовський Р.Р., Мотіль І.М. Дослідження процесу формування паливних брикетів із рослинної сировини та визначення їх характеристик. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. С. 138–146.
7. Калетнік Г.М., Пришляк В.М. Біопалива: ефективність їх виробництва та споживання в АПК України : навчальний посібник. Київ : Аграрна наука, 2010. С. 327.



8. 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.
9. Blagov D.A., Gizatov A.Y., Smakuyev D.R., Kosilov V., 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.
10. Subota S.V. Rezul'taty eksperymental'nykh doslidzhen' roboty hvyntovoho pres-bryketuval'nyka vyrobnytstva palyvnykh bryketiv iz roslynnoyi syrovyny. *Mizhvidomchyy tematychnyy naukovyy zbirnyk Mekhanizatsiya ta elektryfikatsiya sil's'koho hospodarstva*. 2015. Vyp. 97. T. 2. P. 40–46.
11. Вплив параметрів ущільнення рослинної біомаси на показники якості біопаливних брикетів / В.О. Лук'янець та ін. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2014. Вип. 99. Т. 2. С. 103–113.
12. Семірненко С.Л. Дослідження залежності щільності брикетів із соломи озимої пшениці від деяких факторів. *Системотехніка і технології лісового комплексу*. 2011. Вип. 111. С. 112–120.
13. ДСТУ EN ISO 18125:2019 (EN ISO 18125:2017, IDT; ISO 18125:2017, IDT). «Біопаливо тверде. Визначення теплоти згорання».
14. Матвійчук А.С. Сумісне спалювання біомаси і вугілля. *Матеріали науково-технічної конференції «Енергетика майбутнього в Україні: Альтернативність, ефективність, безпека»*, АР Крим, смт Миколаївка, 11–13 жовтня 2013 р. С. 64–65.
15. Бузова З.А., Воробйов Л.Й., Сергієнко Р.В. Калориметричний аналіз якості паливних брикетів та пелет. *Науковий погляд у майбутнє*. 2016. Т. 2. Вип. 4. С. 78–81.
16. Діденко М.М., Кухаренко П.М. Дослідження фізико-механічних властивостей брикетів із соломи пшениці. *Наукові праці НУХТ*. 2019. № 25(3).
17. ДСТУ EN ISO 18122:2022 (EN ISO 18122:2015, IDT; ISO 18122:2015, IDT). «Тверде біопаливо. Визначення вмісту золи».
18. Економічне обґрунтування доцільності переходу на опалення твердим біопаливом. *Гармонізація українських стандартів та стандартів ЄС*. URL: [https://saee.gov.ua/documents/Posibnik\\_for-web-UUP2014%20\(1\).pdf](https://saee.gov.ua/documents/Posibnik_for-web-UUP2014%20(1).pdf)
19. Коломийченко М.В. Дорожня карта з розвитку ринку твердого біопалива України. *Підготовлено в рамках проекту ПРООН/ГЕФ «Розвиток та комерціалізація біоенергетичних технологій у муніципальному секторі в Україні»*, 2016.
20. Обґрунтування типових проектів виробництва і споживання паливних брикетів з агробіомаси в Україні / Г.Г. Гелетука та ін. *Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК»*. 2018. Вип. 282. С. 173–181.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2025

Стаття прийнята 16.10.2025

Статтю опубліковано 25.11.2025



**V. Kuvachov, V. Yalpachyk**

*Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University*

## **STUDY OF THE EFFECT OF MOISTURE AND TEMPERATURE ON THE DENSITY OF BRICKS MADE FROM AGRICULTURAL RAW MATERIALS**

### *Summary*

The use of straw briquettes is an environmentally sound and economically viable alternative to fossil fuels, as this process is carbon neutral and promotes the rational utilization of large volumes of agricultural waste. The aim of the work was to quantitatively substantiate the influence of raw material moisture and pressing temperature on briquette density ( $\rho$ ). The main part of the study consisted of experimental pressing of crushed straw at constant pressure, at temperatures up to 90°C and with moisture variation of 6–12%. Analysis of the results confirmed the nonlinear dependence of density on moisture content, reflecting the complex hydrothermal interaction of biomass components.



An increase in density was observed up to an optimal moisture content of 8%, at which the highest density  $\rho$  (about 1.20 t/m<sup>3</sup>) was achieved at a temperature of 90°C. This combination provides sufficient thermal activation of lignin and hemicellulose, initiating their plasticization. Low moisture content is insufficient for hydrothermal catalysis and softening of the structure, while excess moisture (12%) at high temperatures causes briquette destruction. This occurs due to intense steam formation, when the internal steam pressure physically breaks the unconsolidated structure after the external pressure is removed, which sharply reduces the density and strength. A temperature of 90°C is critical for achieving maximum lignin plasticization. Although high pressure promotes compaction, its increase beyond the saturation point is economically unfeasible due to the increase in the specific energy consumption of the process. The results obtained allow us to formulate optimized technological recommendations for improving the quality of briquettes, which is the key to exploiting the logistical advantages of compacted fuel and its competitiveness in the international market.

**Keywords:** briquettes, briquetting, moisture content, matrix, density, temperature.