

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-13>

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ПРЕСУВАННЯ НА ФІЗИЧНУ ЩІЛЬНІСТЬ БРИКЕТІВ ІЗ РІЗНОТИПНОЇ БІОМАСИ

Анотація. Робота зосереджена на експериментальному аналізі динамічного впливу швидкості пресування на фізичну щільність брикетів, виготовлених із трьох технологічно відмінних видів біомаси: лушпиння соняшнику, соломи та деревної тирси. Дослідження є актуальним для вдосконалення кінетики ущільнення різномірної сировини. Кількісно встановлено нелінійну залежність щільності від швидкості пресування, підтверджено, що раціональний режим є критичним для якості. Максимальні значення щільності для всіх матеріалів досягнуто в діапазоні 10–12 мм/с, що свідчить про ідеальний час для термопластичної консолідації. Відхилення в бік низької швидкості спричиняє локальне термічне перенапруження й деструкцію зв'язувальних компонентів, а надмірне зростання швидкості призводить до збільшення пружної післядії та падіння щільності через недостатність часу на релаксацію. Отримані результати забезпечують наукову основу для диференційованого встановлення раціональних швидкісних режимів у промисловому брикетуванні.

Ключові слова: щільність брикету, сировина, лігнін, швидкість пресування, температура.

Постановка проблеми. Виробництво твердого біопалива у формі брикетів із агропромислових і деревообробних відходів, включаючи лушпиння соняшнику, солому та деревну тирсу, є актуальним напрямом для підвищення енергетичної незалежності [1; 2]. Незважаючи на спільну мету, ці три види сировини мають кардинально відмінні фізико-хімічні властивості (волокнистість, уміст лігніну, фракційний склад і наявність олійних компонентів у лушпинні) [3]. Це призводить до неоднакової реакції на термомеханічне навантаження під час пресування. Наявні технологічні регламенти часто використовують уніфіковані режими, розроблені переважно для деревної тирси. Такий підхід не враховує динамічні реологічні характеристики лушпиння та соломи, що призводить до нестабільної якості кінцевого продукту, його низької механічної міцності й значної пружної післядії.

Ключова проблема полягає в недостатньому розумінні кінетики процесу ущільнення різномірної біомаси. Зокрема, вплив швидкості пресування на формування міцних міжчасткових зв'язків і фінальну щільність залишається малодослідженим у порівняльному аспекті [4]. Неконтрольована швидкість може спричинити локальний перегрів або, навпаки, недостатній час консолідації для кожного окремого типу сировини, що прямо впливає на енергоефективність процесу й експлуатаційний знос обладнання.

Таким чином, виникає науково-технічна необхідність у проведенні порівняльних експериментальних досліджень для встановлення кількісної залежності між швидкістю пресування та фізичною щільністю брикетів для кожного з трьох типів сировини, що дасть змогу розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо диференційованої раціоналізації технологічних режимів.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні наукові дослідження у сфері переробки біомаси на тверде біопаливо зосереджені на кінетиці процесу пресування й термомеханічних взаємодіях, які безпосередньо впливають на кінцеву щільність, механічну міцність та експлуатаційні характеристики брикетів. Аналіз опублікованих робіт свідчить про глибоку диференціацію



підходів, залежно від типу вихідної сировини – деревної, соломистої чи агропромислових відходів, таких як лушпиння соняшнику [5; 6]. Фізико-хімічна природа сировини є детермінуючим фактором, а процес брикетування є термопластичним явищем, в основі якого лежить пластифікація природних полімерів (лігніну, геміцелюлоз) під дією механічної енергії й тепла [7]. У роботах, що стосуються деревної тирси з високим умістом лігніну, дослідники встановили чіткий температурний поріг у 90–120 °С, при досягненні якого лігнін починає переходити у в'язку текучий стан, що є необхідною умовою для максимальної консолідації [8]. У разі дослідження соломистої біомаси з низьким умістом лігніну та високою волокнистістю ключовим обмежувальним фактором визнається пружна післядія, спричинена анізотропією волокон, тому наголошується на необхідності попереднього подрібнення для зниження внутрішніх напружень [9]. Стосовно лушпиння соняшнику вчені акцентують увагу на термодинамічній чутливості цієї сировини, оскільки жирові компоненти хоч і є природними пластифікаторами, але мають низьку термічну стабільність, що може призводити до передчасної деструкції та погіршення зв'язувальних властивостей при неконтрольованому нагріві [10; 11].

Останні роботи активно досліджують швидкість пресування як ключовий динамічний параметр, що контролює час релаксації матеріалу та локальний температурний режим. У наукових джерелах експериментально обґрунтовано, що функціональна залежність кінцевої фізичної щільності брикетів від швидкості пресування демонструє нелінійний, екстремальний характер. Зокрема, при низьких швидкостях збільшений час експозиції матеріалу в зоні ущільнення призводить до надлишкової акумуляції теплової енергії внаслідок дисипації сил тертя, що спричиняє локальне термічне перенапруження сировини [12]. Це викликає термічну деструкцію зв'язувальних елементів та інтенсивне пароутворення, що створює внутрішній тиск і, як наслідок, знижує кінцеву щільність [13]. Натомість при надмірно високій швидкості прискорений процес ущільнення скорочує час витримки під максимальним тиском, що є недостатнім для завершення віскоеластичних і пластичних деформацій [14]. Це призводить до неповної консолідації, збереження значних внутрішніх напружень і зростання коефіцієнта пружної післядії. Крім того, збільшення швидкості викликає зростання питомої енергоємності через інерційні навантаження, що є економічно недоцільним [15]. Сучасні дослідження використовують різні вимірювальні системи, такі як тензометричні датчики та високошвидкісні датчики переміщення, для отримання динамічних кривих у режимі реального часу, забезпечуючи надійну основу для моделювання й оптимізації процесу [16; 17]. Аналіз сучасних досліджень у галузі термомеханічного ущільнення біомаси дає підстави стверджувати про необхідності диференційованої оптимізації швидкості пресування задля запобігання ризику термічного перенапруження як при низьких швидкостях, так і недоущільнення при надмірно високих.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою наукової роботи є експериментальне дослідження й кількісне обґрунтування впливу швидкості пресування на фізичну щільність брикетів, виготовлених із різних видів сировини. Для реалізації поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання: визначити залежність кінцевої фізичної щільності брикетів від швидкості пресування при постійних, заздалегідь встановлених значеннях тиску, температури й вологості, установити кореляцію між швидкістю пресування та коефіцієнтом пружної післядії брикетів, оскільки швидкість впливає на час, відведений для релаксації матеріалу й виходу повітря. За результатами отриманих експериментальних даних сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору раціонального режиму швидкості пресування, який забезпечує максимальну щільність і стійкість паливних брикетів.

Основна частина. Метою цього етапу дослідження було кількісне визначення впливу швидкості пресування на фізичну щільність брикетів, виготовлених із різномірної біомаси: лушпиння соняшнику, соломи та деревної тирси. Експерименти проводилися на лабораторній



установці, що імітує процес високотемпературного пресування, яка оснащена системою прецизійних вимірювальних пристроїв: датчиками тиску, термопарами для контролю температури матриці й датчиком переміщення пуансона для точного контролю швидкості. Параметри тиску, температури та вологості зафіксовані на сталих значеннях, що дало значення ізолювати вплив швидкості як єдиної незалежної змінної. Фізична щільність кожного брикету вимірювалася ваговим методом після 24 годин охолодження для завершення процесу пружної післядії [18]. Вимірювання здійснювалося шляхом зважування брикету на високоточних вагах і визначення його геометричного об'єму за допомогою штангенциркуля з точністю 0,05 мм з подальшим розрахунком за формулою:

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

де m – маса брикету, кг;
 V – об'єм брикету, м³.

Обрані види біомаси являють собою матеріали з кардинально відмінною хімічною структурою та фракційним складом. Отримані дані дослідів, представлені в таблиці 1, виявили нелінійну залежність щільності від швидкості пресування для всіх досліджуваних матеріалів, підтверджуючи існування раціонального швидкісного режиму.

Таблиця 1

Результати досліджень

Швидкість пресування, мм/с	5	10	15	20	25
Щільність паливних брикетів із лущиння соняшнику, т/м ³	1,2	1,25	1,2	1,05	1,
Щільність паливних брикетів із соломи, т/м ³	1,1	1,18	1,1	1,12	1
Щільність паливних брикетів із тирси, т/м ³	1,2	1,25	1,2	1,2	1,1

Графічна залежність, отримана на основі експериментальних даних, представлена на рисунку 1.

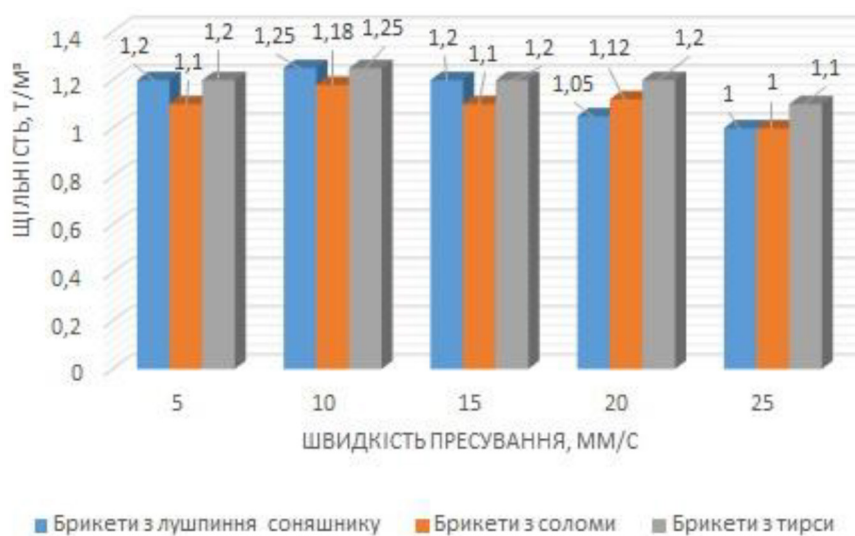


Рис. 1. Графік залежності щільності брикету від швидкості пресування

Низька швидкість пресування 5 мм/с характеризується тривалим часом експозиції матеріалу під дією максимального тиску. Хоча триваліший час теоретично сприяє повноцінній пластичній релаксації та дегазації, на практиці спостерігається зниження щільності порівняно з раціональним режимом [19; 20]. Цей феномен пояснюється термодинамічними ефектами. Трива-



лий контакт матеріалу зі стінками матриці в зоні ущільнення спричиняє локальний перегрів сировини. Перевищення критичної температури призводить до часткової термічної деструкції та зниження в'язкості природних зв'язувальних компонентів. Для лушпиння соняшнику, так як це дрібнодисперсна фракція з умістом олій, погіршуються адгезійні властивості матриці. Також тривалий нагрів викликає інтенсивне внутрішнє пароутворення, яке створює контриск і перешкоджає ефективному механічному ущільненню, що призводить до зниження кінцевої щільності. Деревна тирса, завдяки оптимальному середньо-дисперсному фракційному складу й високій температурній стійкості лігніну, виявилася менш чутливою до цього ефекту.

Режим 10 мм/с забезпечив максимальну фізичну щільність для всіх трьох видів біомаси: лушпиння – 1,25 т/м³, тирса – 1,25 т/м³, солома – 1,18 т/м³. Цей режим являє собою технологічний оптимум, де досягається ідеальний баланс між кінетикою процесу й термопластичною механікою. Цей режим пресування забезпечує повну деформацію частинок і мінімізацію внутрішніх порожнин, а енергія тертя й зовнішній нагрів досягають температури активації лігніну без їх деструкції. Дослід показав, що повітря та надлишкова пара встигають вийти з об'єму матеріалу, а дрібнодисперсна фракція лушпиння й середньо-дисперсна фракція тирси досягають максимального коефіцієнта стискання, що сприяє формуванню монолітної структури.

Збільшення швидкості пресування до 15 мм/с призвело до часткового зниження щільності брикету з лушпиння соняшнику та соломи. Основною причиною зниження щільності є скорочення часу витримки під максимальним тиском, що є недостатнім для повного завершення релаксаційних процесів. Швидке стиснення призводить до акумуляції внутрішніх пружних напружень, викликає значне зростання коефіцієнта пружної післядії після виходу брикету з матриці, зумовлює зниження кінцевої фізичної щільності брикетів. Волокниста структура соломи виявилася найбільш чутливою до цієї динамічної нестачі часу, оскільки вимагає тривалішого часу для реорієнтації волокон. Деревна тирса зберігає високу щільність 1,2 т/м³, підтверджуючи її релаксаційну стійкість у ширшому швидкісному діапазоні. Режими швидкості пресування більше за 20 мм/с демонструють критичне зниження якості брикетів, особливо для лушпиння $\rho = 1,0$ т/м³ та соломи $\rho = 1,0$ т/м³. Це зниження є наслідком недостатнього часу, відведеного для ущільнення й активації зв'язувальних, що унеможливує формування стійких міжчасткових зв'язків. Крім того, висока швидкість призводить до інтенсивного внутрішнього тертя, створює умови для формування мікродфектів і повітряних включень, які не встигають вийти з об'єму матеріалу.

Висновки. Експериментальне дослідження кількісно підтвердило, що швидкість пресування є критичним динамічним параметром, який визначає ефективність ущільнення брикетів із різнорідної біомаси. Установлено, що для лушпиння соняшнику, соломи та деревної тирси існує технологічний раціональний режим швидкості в діапазоні 10–12 мм/с, який забезпечує досягнення максимальної фізичної щільності завдяки оптимальному балансу між часом для термопластичної консолідації та пластичної релаксації. Відхилення в бік низької швидкості менше ніж 5 мм/с призводить до зниження щільності через локальний перегрів і термічну деструкцію зв'язувальних речовин, тоді як висока швидкість більша за 15 мм/с викликає різке падіння щільності внаслідок недостатності часу консолідації та значного зростання пружної післядії. Таким чином, для забезпечення максимальної якості продукту й раціонального використання енергії жорсткий контроль швидкості пресування в установленому раціональному діапазоні є обов'язковим.

**Список використаних джерел**

1. Хіврич О. Б. Енергетичні рослини як альтернатива традиційним видам палива. *Агробіологія*. 2011. Вип. 6. С. 153–157.
2. Гелетуха Г. Г. та ін. Аналіз можливостей виробництва і споживання паливних брикетів з біомаси сільськогосподарського походження в Україні. Частина 2. *Теплофізика та теплоенергетикам*. 2019. Т. 41, № 1. С. 67–73.
3. Ткачук Р. А., Заєць, Л. М. Технологія виробництва біопалива з відходів сільського господарства. *Аграрна наука та виробництво*. 2017. № 1(18). С. 78–83.
4. Говоруха В. Б., Луц П. М., Кисельов О. В. Результати лабораторних досліджень процесу виготовлення паливних брикетів з ріпакової соломи. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 2. С. 23–31.
5. Mani S., Tabil L., Sokhanshaj S. Effects of compressive force, size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*. 2006. Vol. 30, № 7. P. 648–654.
6. Кіндзера Д. П., Атаманюк В. М. та ін. Дослідження процесу формування паливних брикетів із рослинної сировини та визначення їх характеристик. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2013. Вип. 23. С. 138–146.
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. № 3(110). С. 67–74.
8. Пурдик В. П. Обґрунтування основних експлуатаційних параметрів обладнання для виробництва паливних брикетів. *Тези доповідей, на 12-му Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові*. Львів, 2015. С. 73–74.
9. Kang Y. S., Spillman C. K., Steele J. L., Chung D. S. Mechanical Properties of Wheat. *Transactions of the ASAE*. 1995. № 38(2). P. 573–578.
10. Атаманюк В.М. Сушіння подрібнених стебел сояшника в умовах фільтрації теплоносія. *Сучасні технології та обладнання харчових виробництв* : збірник тез доп. Міжнар. наук.-техн. конф. Тернопіль, 2011. С. 188.
11. Rindyuk D. V. The method of determination of the optimal parameters of dispersed materials granulation through consolidation. *Food and Environment Safety. Journal of Faculty of Food Engineering, Ștefan cel Mare University*. 2012. Vol. XI, Iss. 2. P. 15–18.
12. Бурдяк В. М. Брикетування відходів деревини та сільського господарства. *Технологія та обладнання*. Вінниця : ВНТУ, 2018. С. 120–135.
13. 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.
14. Ярмолук М. В., Романюк І. П. Дослідження процесу брикетування біомаси під високим тиском. *Промислова теплотехніка*. 2019. № 41(2). С. 70–76.
15. Тверде біопаливо: технологічні вимоги, властивості компонентів та технологія виробництва. *Агробізнес сьогодні*. № 19. С. 290.
16. Єременко О. І., Василенков В. Є., Руденко Д. Т. Дослідження процесу брикетування біомаси шнековим механізмом. *Інженерія природокористування*. 2020. № 3(17). С. 15–22.
17. Бойко В. С., Самойчук К. О., Тарасенко В. Г., Паляничка Н.О. та ін. *Процеси і апарати. Серія «Механічні та гідромеханічні процеси»*. Київ : Проф-Книга, 2021. С. 468.
18. Markowski M., Żuk-Gołaszewska K., Kwiatkowski. D. Influence of variety on selected physical and mechanical properties of wheat. *Industrial Crops and Products*. 2013. № 47. 113–117.
19. ДСТУ EN ISO 17831-1:2022 (EN ISO 17831-1:2015, IDT; ISO 17831-1:2015, IDT). Біопаливо тверде. Визначення механічної міцності пелет і брикетів. Частина 1.
20. ДСТУ 7124:2009. Лушпиння сояшникове пресоване гранульоване. Технічні умови.

Дата першого надходження статті до видання: 20.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





V. Kuvachov, O. Chervotkina

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

STUDY OF THE EFFECT OF PRESSING SPEED ON THE PHYSICAL DENSITY OF BRIQUETTES MADE FROM DIFFERENT TYPES OF BIOMASS

Summary

This work focuses on the experimental analysis of the dynamic influence of pressing speed on the formation and final physical density of briquettes made from three technologically different types of biomass: sunflower husks, straw, and wood sawdust. The research is relevant for improving the kinetics of compacting heterogeneous raw materials and increasing the overall efficiency of production processes, taking into account the unique chemical composition of each material.

A nonlinear dependence of density on pressing speed has been quantitatively established, confirming that the optimal speed regime is a critical determining parameter for the quality of the final product. The maximum density values for all materials studied were achieved in a narrow range of 10–12 mm/s, indicating the achievement of the ideal time required for complete thermoplastic consolidation and effective air removal (degassing).

A detailed analysis of deviations revealed that movement towards a low speed of less than 5 mm/s causes local thermal overstressing of the material. Prolonged contact with the matrix leads to excessive friction, causing destruction of the binding components (especially oil fractions in the husk) and intense steam formation, which creates internal counter pressure, significantly reducing the final density. On the other hand, an excessive increase in speed of more than 15 mm/s leads to a critical drop in density and an increase in the elastic aftereffect coefficient due to insufficient time to complete viscoelastic relaxation and the formation of strong interparticle bonds.

The results obtained provide a scientific basis for the differentiated establishment of rational speed regimes in industrial briquetting, which will minimize energy costs, reduce equipment wear, and ensure consistently high quality of the final biofuel. This increases the economic feasibility of biomass processing.

Keywords: briquette density, raw materials, lignin, pressing speed, temperature.