

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

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 ЗАЛЕЖНОСТІ ЩІЛЬНОСТІ ДЕРЕВНИХ БРИКЕТІВ ВІД РОЗМІРУ ЧАСТИНОК СИРОВИНИ

*Анотація.* У статті досліджено вплив фракційного складу деревної тирси на щільність паливних брикетів, отриманих високотемпературним пресуванням. Метою роботи було кількісне обґрунтування раціонального розміру фракції для забезпечення максимального ущільнення. Експерименти проводилися з монофракціями від 2 до 6 мм за фіксованих параметрів пресування 100–110 °С та вологості сировини 8 %. Аналіз результатів показав, що найвища щільність була досягнута з використанням фракції розміром 4 мм. Оптимум пояснюється найкращим балансом між пластичною податливістю й ефективністю укладання, що сприяє якісній термопластичній консолідації лігніну. Встановлено, що використання як надмірно дрібної, так і грубої фракції знижує щільність продукту.

*Ключові слова:* брикетування, тирса, брикети, лігнін, тиск, вологість, щільність, термомеханічна активація.

*Постановка проблеми.* На тлі зростаючої ролі твердого біопалива з деревинних відходів якість кінцевого продукту, паливних брикетів, залишається критичним чинником його економічної ефективності [1; 2]. Ключовим показником якості є фізична щільність, яка прямо впливає на теплотворну здатність, логістичні витрати й опірність брикету механічним навантаженням. Технологічний процес брикетування на пресовому обладнанні потребує ретельної підготовки сировини [3]. Зокрема, фракційний склад (розмір частинок) тирси є фундаментальним, але часто недооціненим параметром. Нераціональний розмір частинок може суттєво перешкоджати процесу ущільнення. Надто дрібна фракція, незважаючи на її високу питому поверхню, може поглинати надмірну кількість вологи та створювати перешкоди для ефективного видалення повітря під час пресування, призводячи до утворення мікропорожнин. Натомість занадто великі частинки (груба фракція) зменшують контактну поверхню між частинками, перешкоджаючи активації лігніну – природного зв'язуючого. Отже, виникає потреба кількісно визначити раціональний фракційний склад тирси, який за сталих режимів пресування (температура, вологість) забезпечить максимальну щільність кінцевого продукту. Вирішення цієї актуальної науково-технічної задачі створить умови для оптимізації технологічного процесу подрібнення сировини, що, зі свого боку, підвищить загальну ефективність виробництва твердого біопалива.

*Аналіз останніх досліджень.* Процес виготовлення паливних брикетів із деревної тирси є предметом інтенсивних наукових досліджень у сфері біоенергетики, оскільки його ефективність визначається складністю фізико-хімічних і механічних явищ, що відбуваються під час ущільнення [4]. Роботи численних наукових груп підтверджують, що кінцева якість продукту – його щільність, механічна міцність і теплотворна здатність – безпосередньо залежить від термопластичної поведінки лігноцелюлозної сировини та від рівня оптимізації ключових технологічних параметрів. Дослідження в цій сфері чітко вказують, що брикетування базується на двох взаємопов'язаних механізмах: пластичній деформації та термопластичній активації лігніну. Лігнін, який є природним високомолекулярним полімерним зв'язуючим, становить зна-



чну частку деревної біомаси [5]. Встановлено, що в разі нагрівання понад 80 °С за певної вологості сировини лігнін переходить у в'язкотекучий стан. Цей перехід у термопластичний стан критично важливий і дає змогу лігніну обволікати частки целюлози та геміцелюлози, створюючи міцні міжмолекулярні й адгезійні зв'язки за подальшого прикладання високого тиску, який зазвичай варіюється в діапазоні до 100 МПа [5; 8]. Саме цей процес забезпечує формування монолітної, гомогенної структури брикету без потреби у використанні будь-яких зовнішніх хімічних або синтетичних клеїв. Численні дослідники підкреслюють вирішальне значення вологості сировини [6; 7]. Встановлено, що вода функціонує як гідротермальний пластифікатор, що має подвійний вплив: з одного боку, вона знижує температуру активації лігніну, сприяючи його ранньому й ефективному розм'якшенню, з іншого боку, існує вузький оптимальний діапазон вологості, який більшість авторів визначають як 5–10 %. Якщо вологість нижча за цей діапазон, пластичність матеріалу недостатня, а якщо ж вологість вища за 10 %, надмірна кількість води перетворюється на високотемпературну пару, що призводить до посиленої пружної післядії, розтріскування та деформації брикетів після їхнього виходу з матриці. Особлива увага в дослідженнях приділяється впливу фракційного складу (розміру частинок), оскільки ця залежність має екстремальний, нелінійний характер [9; 10]. Наукові групи, які вивчають механіку пресування, вказують, що частки менше за 1–2 мм, незважаючи на їхню теоретичну пластичність, ускладнюють процес видалення повітря через високе внутрішнє тертя, що призводить до підвищення кількості замкнених мікро порожнин та знижує ступінь ущільнення [11; 12]. Водночас грубі фракції 9–10 мм є небажаними, оскільки їхня внутрішня жорсткість та відносно мала питома поверхня перешкоджають повній пластичній деформації і ефективному цементуванню лігніном. Це призводить до формування слабких точкових зв'язків і низької кінцевої щільності. Загальноприйнятим висновком є те, що найбільш ефективним є середній розмір фракції від 3 до 8 мм, який забезпечує найкращий компроміс між ефективністю укладання та пластичною податливістю, що є критичною передумовою для максимізації щільності брикету, його механічної міцності й енергетичної ефективності [13; 14]. Таким чином, сучасні наукові дослідження чітко визначають, що оптимізація підготовки сировини, зокрема точний контроль вологості та фракційного складу, є ключовою інженерною задачею для підвищення якості та конкурентоспроможності кінцевого біопалива [15; 16].

*Формулювання цілей статті.* Метою роботи є експериментальне дослідження та кількісне обґрунтування впливу фракційного складу деревної тирси на щільність паливних брикетів. Завдання передбачають проведення аналізу гранулометричного складу вихідної сировини, розділ її на чітко визначені фракції та експериментальне виготовлення брикетів з кожної фракції за фіксованого режиму пресування ( $T = 100\text{--}110$  °С,  $W = 8$  %). Потрібно кількісно оцінити й порівняти щільність брикетів, отриманих із різних фракцій, на основі цих даних визначити раціональний фракційний склад, що забезпечує максимальний ступінь ущільнення.

*Основна частина.* Комплексне вивчення процесу брикетування подрібнених деревних відходів потребує чіткої стандартизації технологічних умов для забезпечення достовірності та порівнянності отриманих даних [17; 18]. У цьому дослідженні було зосереджено увагу на кількісному визначенні впливу фракційного складу (розміру частинок) сировини на кінцеву фізичну щільність продукту. Як вихідний матеріал використовувалися подрібнені деревні відходи соснових порід. Підготовка сировини розпочалася з етапу контрольованої термічної обробки (сушіння) [19; 20]. Усю сировину незалежно від її початкового вмісту вологи було доведено до фіксованого рівня  $W = 8$  %. Цей показник вологості було вибрано як раціональний на основі попередніх досліджень, оскільки волога в цьому діапазоні функціонує як гідротермальний каталізатор, сприяючи активізації лігніну та його ефективному переходу у в'язкотекучий стан. Процес сушіння контролювався із застосуванням лабораторного обладнання. Після

досягнення цільової вологості сировина зберігалася в герметичних умовах. Наступним етапом було подрібнення та фракціонування. Підготовлена сировина піддавалася ситовому аналізу для отримання п'яти фракцій із чітко визначеними середніми розмірами частинок: 2, 3, 4, 5, 6 мм. Така методика забезпечила достовірність впливу досліджуваного параметра. Експерименти проводилися на лабораторному пресі, оснащеному високоточними системами контролю параметрів, що гарантувало стабільність умов пресування. Технологічні параметри пресування були суворо фіксовані для всіх зразків: тиск підтримувався у вузькому діапазоні, а температура матриці – в інтервалі  $T = 100\text{--}110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Час витримки під тиском для всіх зразків становив 30 секунд. Ключовий показник якості – щільність брикету – вимірювався після повного охолодження брикетів для достовірного обліку об'єму та мінімізації впливу пружної післядії, результати досліджень показані в таблиці 1.

Таблиця 1

Показники досліджень

Розмір фракції, мм	2	3	4	5	6
Щільність брикету, т/м <sup>3</sup>	1,1	1,16	1,2	1,14	1

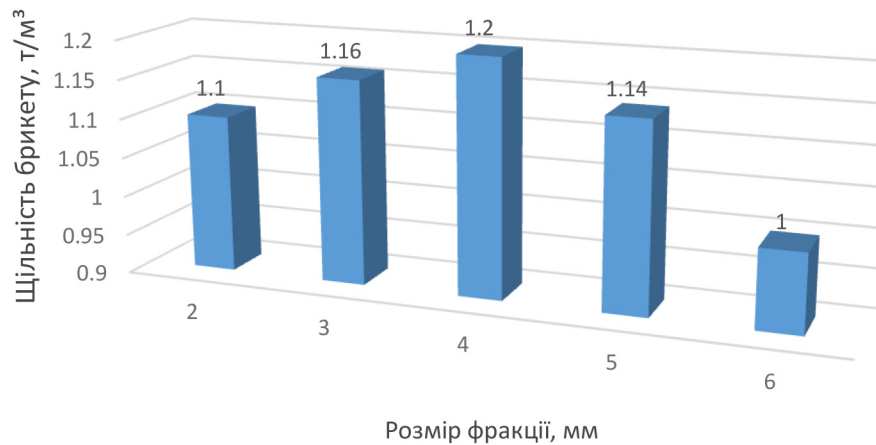


Рис. 1. Залежність щільності брикету від розміру фракції сировини

Аналіз отриманих результатів (рис. 1) вказує на нелінійну залежність щільності брикету від розміру частинок, що демонструє чітко виражений екстремум. Спостерігається стійке зростання щільності за збільшення розміру фракції від 2 до 4 мм. Мінімальна щільність у досліджуваному діапазоні  $\rho = 1,1\text{ т/м}^3$  отримана з використанням фракції 2 мм, хоча дрібна фракція і є більш пластичною, її ущільнення ускладнюється підвищеним питомим тертям і неефективним видаленням повітря з великої кількості мікропорожнин. Максимальне значення щільності  $\rho = 1,2\text{ т/м}^3$  досягнуто з фракцією 4 мм. Фізико-хімічне обґрунтування цього оптимуму полягає у досягненні найкращого балансу між ефективністю укладання та пластичною податливістю частинок під тиском. Фракція 4 мм є достатньо великою для ефективного видалення повітря та мінімізації пустот, але водночас має достатню відносну площу поверхні для гомогенної активації лігніну та формування міцних площинних зв'язків між частинками за температури вже  $100\text{--}110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Подальше збільшення розміру частинок призводить до помітного зниження щільності, а за розміру 6 мм щільність падає до  $\rho = 1\text{ т/м}^3$ . Цей спад зумовлений переважанням внутрішньої жорсткості великих частинок над їхньою пластичною податливістю. Грубі фракції не можуть повноцінно деформуватися та заповнити об'єм, що призводить до формування численних порожнин у тілі брикету. Зв'язок між ними обмежується точками контакту замість монолітного цементування лігніном. Таким чином,



експериментально встановлено, що фракційний склад є критичним для максимізації щільності та якості твердого біопалива.

*Висновки.* За результатами проведеного експериментального дослідження впливу фракційного складу деревної тирси на щільність паливних брикетів, отриманих методом високотемпературного пресування, встановлено, що цей параметр має критичне значення для якості кінцевого продукту. Чітко визначено, що раціональним є використання фракції розміром 3–4 мм, яка забезпечила максимальну щільність  $1,2 \text{ т/м}^3$  за сталих режимів пресування. Цей режим відповідає найкращому балансу між ефективністю укладання частинок та їхньою пластифікацією лігніну на контактних поверхнях, що є необхідною умовою для формування гомогенної, монолітної структури. Доведено, що використання фракцій як менших за 2 мм, так і більших за 6 мм призводить до значного зниження щільності. Зокрема, груба фракція знижує щільність через недостатню пластичну деформацію та формування слабких точкових зв'язків. Отримані кількісні дані дають можливість сформулювати технологічні рекомендації щодо необхідності точного контролю й оптимізації процесу подрібнення тирси. Дотримання встановленого критичного оптимуму фракційного складу є ключовим етапом для підвищення якості, міцності та, як наслідок, енергетичної ефективності й конкурентоспроможності твердого біопалива.

#### Список використаних джерел

1. Шевченко О. О. Використання вторинних ресурсів для ефективного теплопостачання виробничих та побутових приміщень в сільській місцевості. *Науковий вісник НУБіП України* : зб. наук. праць. Вид-во НУБіП України, 2009. № 134.
2. Полянський О. С., Д'яконов В. І., Д'яконов 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.
3. Меркулов В. М., Запорожець О. І. Розробка технології отримання паливних брикетів з деревної тріски. *Лісове та садово-паркове господарство*. 2021. № 19. С. 105–112.
4. Гелетуха Г. Г. Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні. *Практичний посібник*. Поліграф плюс, 2015. 72 с.
5. Гунько О. В. Оптимізація процесу пресування біомаси для виробництва паливних гранул. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. Механізація та автоматизація виробничих процесів. 2017. № 4 (31). С. 98–103.
6. Клименко В. В., Кравченко В. І., Кириченко А. М., Личук М. В., Солдатенко В. П. Експериментальна оцінка виготовлення твердого біопалива з композитів на основі рослинних відходів. *Енерготехнології и ресурсосбережение*. 2016. № 3. С. 18–24.
7. 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 (121). С. 23–31.
8. Ярмолюк М. В., Романюк І. П. Дослідження процесу брикетування біомаси під високим тиском. *Промислова теплотехніка*. 2019. № 41 (2). С. 70–76.
9. Клименко В. В. Результати попередніх досліджень виготовлення паливних пелет з рослинних відходів. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції*. Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві. Кропивницький : КНТУ, 2015. С. 45–46.
10. Buravchuk N. I., Guryanova O. V. Technology for the Joint Briquetting of Waste Coal and Sawdust. *Solid Fuel Chemistry*, September, 2018. Vol. 52 (5). P. 308–312.
11. ДСТУ 8358:2015. Брикети та гранули паливні з деревинної сировини. *Технічні умови*.
12. Литвин О. С., Мельник Р. П. Виробництво брикетів з відходів ріпаку: технологічні аспекти. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. 2019. № 200. С. 156–163.
13. Поліщук А. А., Сидоренко І. В. Термодинамічні аспекти брикетування біомаси. *Відновлювальна енергетика*. 2020. С. 50–57.



14. 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.
15. Комар А. С., Болтянський Б. В. Конструктивно-технологічне вдосконалення вальцевих грануляторів з плоскою матрицею. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. Гол. ред. д-р техн. наук, проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь : ТДАТУ. 2023. Вип. 13, том 1. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-11.
16. Бойко В. С., Самойчук К. О., Тарасенко В. Г., Верхованцева В. О., Паляничка Н. О., Михайлов Є. В., Червоткіна О. О. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси. Київ : ПрофКнига. 2021. 468 с.
17. Панасюк В. М., Смірнов А. Г. Моделювання процесів ущільнення біомаси в шнекових пресах. *Вісник аграрної науки*, 2018. № 12. С. 60–65.
18. Blagov D. A., Gizatov A. Y., Smakuyev D. R., Kosilov V. I., Pogodaev V. A., Overview of feed granulation technology and technical means for its implementation. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. 2020, Vol. 613 (1), 012018
19. Корінчук Д. М. Дослідження впливу технологічних факторів брикетування та параметрів компаундування на якісні показники композиційного торфодеревинного палива. *Відновлювана енергетика : наук.-прикл. журнал*. 2009. № 1. С. 63–70.
20. Технологія виробництва різних видів біопалива. *Електронний ресурс*. «Біопаливо та котли України», 3 листопада 2012 р. URL: <http://bio.ukrbio.com/ua/articles/2344/>

Стаття надійшла до редакції 25.10.2025

Стаття прийнята 10.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



**B. Boltianskyi**

**Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University**

## **STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE DENSITY OF WOOD BRICKS ON THE SIZE OF RAW MATERIAL PARTICLES**

### *Summary*

The article investigates the influence of the fractional composition (particle size) of wood sawdust on the physical density of fuel briquettes obtained by high-temperature pressing. The aim of the work was to quantitatively justify the rational fraction size necessary to ensure the maximum degree of material compaction under a constant technological regime. The experiments were conducted using five clearly defined monofractions of sawdust in the range from 2 to 6 mm. The pressing conditions were strictly fixed: the matrix temperature was 100–110 °C, which corresponds to the conditions for lignin activation, and the moisture content of the raw material was maintained at an optimal level of 8 %.

Analysis of the results showed a nonlinear dependence of density on particle size, with a pronounced extremum. The highest density  $\rho = 1.2 \text{ t/m}^3$  was achieved using a fraction size of 4 mm. This optimal fraction size is explained by the achievement of the best balance between the plastic compliance of particles under high pressure of and the efficiency of packing (minimization of voids). It has been established that the use of an excessively fine fraction significantly complicates air removal and increases internal friction, while a coarse fraction of more than 6 mm reduces the density to  $\rho = 1 \text{ t/m}^3$  due to its internal rigidity and insufficient contact area for the formation of a monolithic structure.

This confirms that a fraction composition of 4 mm is the critical technological optimum for ensuring high-quality thermoplastic consolidation of lignin. The quantitative data obtained can be used to improve the raw material grinding stage on industrial lines. This will minimize the energy costs of grinding and maximize the mechanical stability of the finished biofuel product, as well as formulate practical recommendations for improving quality and competitiveness.

**Keywords:** briquetting, sawdust, briquettes, lignin, pressure, moisture content, density, thermo mechanical activation.