

С. Л. СЕМІРНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри проектування технічних систем  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-9304-3637

Ю. І. СЕМІРНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри транспортних технологій  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-4230-4614

## БРИКЕТУВАННЯ БАДИЛЛЯ КАРТОПЛІ ЯК СПОСІБ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ

У статті розглянуто можливість використання бадилля картоплі як сировини для виробництва твердого біопалива. Україна входить до п'ятірки найбільших виробників картоплі у світі, тому щорічно утворюється значна кількість побічної біомаси, яка здебільшого не утилізується та спалюється на полях, що спричиняє екологічні втрати. Робота спрямована на визначення оптимальних параметрів процесу брикетування бадилля картоплі з метою отримання енергоефективного палива.

У ході дослідження проаналізовано фізико-механічні властивості бадилля: вологість, ламкість, густину, вміст лігніну. Встановлено, що воно містить 10–20% лігніну, який виконує роль природного зв'язуючого компонента, тому не потребує додаткових домішок. Експериментально визначено вплив основних технологічних факторів – вологості, ступеня подрібнення та тиску пресування – на якість отриманих брикетів.

Результати показали, що зниження вологості підвищує ламкість матеріалу, полегшуючи подрібнення, проте при вологості нижче 8% біомаса стає крихкою і пилить. Оптимальний діапазон вологості для пресування становить 8–12%. Найкращі показники досягаються при розмірі часток 5 мм і тиску пресування 100 МПа: щільність брикетів становить близько 1020 кг/м<sup>3</sup>, що відповідає промисловим стандартам твердого біопалива.

Отримані результати підтверджують доцільність залучення бадилля картоплі до біоенергетичних технологій. Реалізація запропонованої технології дозволить скоротити обсяги аграрних відходів, зменшити викиди парникових газів та підвищити енергетичну незалежність України, використовуючи місцеві відновлювані ресурси.

**Ключові слова:** бадилля картоплі, біомаса, брикетування, паливні брикети, щільність, енергоефективність, ступінь подрібнення, вологість, тиск пресування.

S. L. SEMIRNENKO

PhD (Engineering), Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Technical Systems Design  
Sumy National Agrarian University  
ORCID: 0000-0002-9304-3637

Y. I. SEMIRNENKO

PhD (Engineering), Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Transport Technologies  
Sumy National Agrarian University  
ORCID: 0000-0002-4230-4614

## BRIQUETTING OF POTATO HAULM AS A METHOD OF EFFECTIVE USE OF PLANT BIOMASS

The article investigates the potential of potato haulm as a raw material for the production of solid biofuels. Ukraine ranks among the world's top five potato producers, resulting in the generation of significant amounts of unused plant residues that are often burned in fields, causing environmental damage and energy loss. The research aims to determine optimal parameters for briquetting potato haulm to obtain energy-efficient solid fuel.

The physical and mechanical properties of potato haulm were analyzed, including moisture content, brittleness, density, and lignin concentration. It was found that the material contains 10–20% lignin, which serves as a natural binder,

eliminating the need for additional additives. Experimental studies determined the effect of moisture content, particle size, and pressing pressure on briquette density and quality.

Results showed that reducing moisture increases brittleness and facilitates grinding; however, excessive drying (<8%) leads to material fragility and dust formation. The optimal moisture range for briquetting was identified as 8–12%. The best results were obtained with a particle size of 5 mm and a pressing pressure of 100 MPa, achieving briquette density of about 1020 kg/m<sup>3</sup>, corresponding to industrial biofuel standards.

The findings confirm the feasibility of using potato haulm as a promising bioenergy feedstock. Implementation of the proposed briquetting technology will reduce agricultural waste, lower greenhouse gas emissions, and enhance Ukraine's energy independence through the use of renewable plant biomass.

**Key words:** potato haulm, biomass, briquetting, fuel briquettes, density, energy efficiency, particle size, moisture content, pressing pressure.

### Постановка проблеми

Україна належить до п'яти найбільших виробників картоплі у світі. Середній обсяг її виробництва становить близько 22,5 млн т, причому понад 98% вирощується у господарствах населення [1, 2, 3]. Щорічно утворюються великі обсяги відходів – бадилля картоплі, яке часто спалюється на полях, що спричиняє забруднення атмосфери та втрату потенційного енергоресурсу.

Підвищення вартості енергоресурсів та необхідність скорочення викидів парникових газів стимулюють пошук нових видів твердого біопалива. Значна частина органічних відходів сільського господарства, зокрема бадилля картоплі, залишається невикористаною, хоча може бути ефективно перетворена на енергію.

Актуальним є створення технології, яка дозволить перетворити рослинні рештки на паливо, зокрема через процес брикетування.

Зростання вартості викопного палива та потреба у скороченні викидів парникових газів вимагають розвитку відновлюваних джерел енергії [4, 5].

Основні труднощі його використання:

- висока природна вологість (до 75% у свіжому стані);
- низька насипна густина ( $\approx 133$  кг/м<sup>3</sup>);
- труднощі транспортування та зберігання.

Тому брикетування бадилля картоплі є доцільним шляхом його утилізації з перетворенням на енергоефективне паливо.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження використання біомаси для енергетики активно проводяться в Інституті технічної теплофізики НАН України, а також у наукових установах НУБіП та КПІ.

Згідно з оцінками Гелетухи О.Г. та Железної Т.А., потенціал аграрної біомаси України перевищує 25 млн т у.п. на рік, з яких понад 30% становлять рослинні рештки [6, 7]. Башмакова Г.П. у своїй роботі [4] зазначає, що найбільш перспективними є технології брикетування та гранулювання як способи підвищення щільності біопалива. Митрофанов В.С. [8] та Козак І.І. [9] дослідили фізико-механічні властивості стеблової біомаси (соломи, гичі), визначивши параметри подрібнення і пресування. Дослідження Демко І. В., Морозов О. В., Кузнецов О. В. [10] присвячено оптимізації процесів брикетування соломи та лушпиння.

Разом із тим, бадилля картоплі вивчено недостатньо – відсутні комплексні дослідження його енергетичних характеристик, впливу вологості на міцність брикетів і параметрів екструзії.

Таким чином, подальші дослідження мають бути спрямовані на наукове обґрунтування технології брикетування бадилля картоплі як ефективного джерела біоенергії.

### Формування мети дослідження

Метою дослідження є визначення оптимальних параметрів процесу брикетування бадилля картоплі (вологість, тиск, гранулометричний склад) і оцінка отриманих брикетів за щільністю, міцністю та теплотворною здатністю.

### Викладення основного матеріалу дослідження

З урахуванням середнього співвідношення маси бадилля до бульб 48,5% [11, 12] річний потенціал утворення сухого бадилля становить близько 10 млн т, що еквівалентно понад 100 ПДж енергії при теплотворній здатності 10,8 МДж/кг.

У роботі нами були проаналізовані фізико-механічні властивості бадилля картоплі [13]:

- діаметр стебел 4–20 мм;
- довжину 60–90 см;
- густину в ущільненому стані 133 кг/м<sup>3</sup>;
- зусилля розриву 25 – 47 кг.

У таблиці 1 наведені орієнтовні дані по сухій масі бадилля картоплі.

Виявлено із таблиці 1, сира надземна маса картопляного бадилля містить 75–85% вологи, що характерно для свіжих рослинних решток. Наведений діапазон урожайності підтверджує, що бадилля картоплі має значний

потенціал для використання в енергетичних цілях. За сприятливих умов і високої агротехніки врожайність може сягати 50 т/га, що робить його перспективним для біоенергетичних технологій. В той же час показник сухої біомаси (3-10 т/га) є співставним із іншими польовими культурами, які використовуються як сировина для біоенергетики, що підтверджує можливість залучення картопляного бадилля до біоенергетичних систем (брикетування).

Таблиця 1

## Орієнтовні дані по сухій масі бадилля картоплі

Показник	Орієнтовне значення
Вміст сухої речовини у свіжому бадиллі	15–25 %
Урожайність сирови надземної маси	20–40 т/га (іноді до 50 т/га у вологі роки)
Вихід сухої речовини з 1 га	3–10 т/га
Співвідношення сухої маси бадилля до сухої маси бульб	приблизно 1:2 – 1:4
Частка листків у сухій масі бадилля	40–50 %, решта – стебла

Суша надземна маса картоплі (бадилля) характеризується високим вмістом структурних вуглеводів – целюлози, геміцелюлози та лігніну. Ці компоненти визначають механічні властивості біомаси, зокрема її ламкість при різному рівні вологості.

Проведено дослідження з визначення ламкості бадилля картоплі залежно від вологості. Так, при високій вологості бадилля (>20–25%) – при збереженні природної або підвищеної вологості рослинні волокна залишаються еластичними. Вода діє як пластикатор, зменшуючи внутрішнє тертя між волокнами та підвищуючи гнучкість біомаси. При цій вологості стебла гнуться, не руйнуються, знижується пиловиділення, але подрібнення ускладнюється (ниткоподібні волокна “тягнуться”).

При помірній вологості (10–20%) бадилля починає втрачати еластичність, однак ще зберігає здатність до деформації без повного руйнування. Погіршення гнучкості підвищує крихкість, проте структура не стає повністю ломкою.

Як показали власні дослідження даної вологості можна досягнути за рахунок природної сушки на полі при сприятливих погодних умовах чи досушування під навісами з вентиляцією.

При низькому рівні (<10%) вологи вода майже повністю видаляється з клітинних стінок, що призводить до:

- втрати зв'язків між целюлозними мікрофібрилами
- підвищення жорсткості й ламкості
- формування дрібних осколків і пилу при механічній обробці.

При даній вологості бадилля легко подрібнюється, утворюється значна кількість пилу, що потребує засобів пилоподавлення.

Вплив вологості на ламкість бадилля картоплі наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

## Вплив вологості на ламкість бадилля картоплі

Вологість, %	Характер стану матеріалу	Ламкість, %*	Коментар
5–8	повністю сухий	90–95	дуже крихке, пиління
10	пересушене	85	оптимально для подрібнення
12	стандарт зберігання	78	рівновага з навколишнім повітрям
15	сухе, але еластичність збільшується	65	падіння ефективності подрібнення
20	помірно вологе	45	гірше кришиться, підвищена енерговитрата
25	вологе	30	потребує попереднього підсушування
30	сире	10–15	практично не ламається

\*Ламкість – умовний показник (% часток, що переходять у фракцію < 10 мм після подрібнення).

Графічно залежність ламкості бадилля картоплі від вологості представлена на рисунку 1.

Залежність ламкості бадилля картоплі від вологості можна представити у вигляді наступної формули:

$$B = 0,0193W^2 - 4,3955W + 126,71, \quad (1)$$

де  $B$  – ламкість стебел, %;

$W$  – вологість, %.

Графік показує, що із зменшенням вологості бадилля картоплі зростає його ламкість. При вологості нижче 10% матеріал стає максимально крихким, що полегшує подрібнення, але підвищує пиловиділення.

Наступні дослідження були спрямовані на визначення вмісту лігніну у сухому бадиллі картоплі.

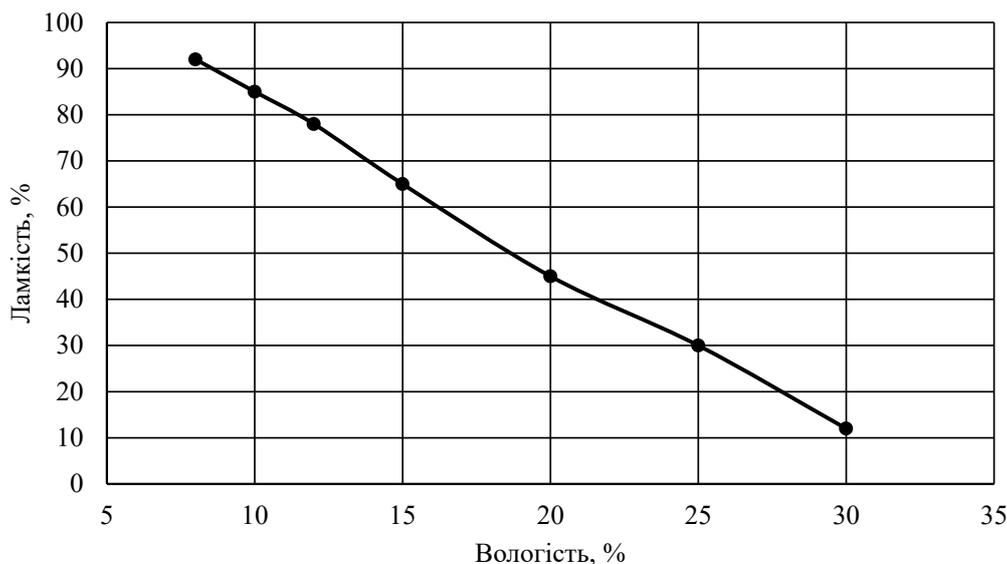


Рис. 1. Залежність ламкості бадилля картоплі від вологості

Лігнін є природним полімером, що входить до складу рослинної біомаси (солома, стебла, деревина тощо). Під час процесу брикетування він виконує ключову роль – природного в’язучого, завдяки чому можна формувати міцні брикети без додавання хімічних домішок [14]. Таким чином, чим більше лігніну міститься у біомасі, тим легше та ефективніше проходить процес брикетування, а отримані брикети мають вищу міцність і енергетичну цінність [15].

Проведені попередні дослідження показали, що середній вміст лігніну в сухому бадиллі картоплі знаходиться в межах 10-20% [16, 17]. Для порівняння, у таблиці 3 наведемо орієнтовний вміст лігніну деяких видів рослинної біомаси, що використовується у якості палива.

Таблиця 3

**Вміст лігніну у соломі зернових культур та сухому бадиллі картоплі**

Культура	Вміст лігніну, %
Пшениця (солома)	11–26
Ячмінь (солома)	14–20
Жито (солома)	15–19
Овес (солома)	17–22
Кукурудза (стебла/солома)	15–20
Рапс (солома)	15–18
Соя (стебла)	14–18
Сорго (стебла)	12–25
Гречка (солома)	15–19
Соняшник (стебла)	17–22
Рослинна біомаса/фракція	Орієнтовний вміст лігніну, % від сухої речовини
Пшенична солома (усі частини)	~ 16,5 %
Солома озимого ріпаку (стебло)	~ 22,9 %
Недеревна біомаса (узагальнено для рослин)	12-20 %
Бадилля картоплі	~ 10-20 %

Виявлено із таблиці 3, вміст лігніну в сухому бадиллі картоплі наближено такий, як у соломі більшості сільськогосподарських культур. Це дало можливість припустити, що даного відсотку лігніну достатньо для ефективного брикетування, а отримані брикети будуть мати достатню міцність та енергетичну цінність.

Подальші дослідження проводилися по визначенню впливу наступних показників бадилля картоплі на щільність брикетів: вологість, ступінь подрібнення та тиск пресування. Дослідження процесу брикетування проводилися на пресі RUF 400, розмір брикетів 150x60 мм.

На основі досліджень різних авторів по подрібненню біомаси сільськогосподарських культур з метою подальшого брикетування задаємось попередньо тиском пресування 100 МПа [14, 19, 20].

Ступінь подрібнення бадилля при дослідженнях по визначенню впливу вологості на щільність паливних брикетів приймали 5 мм.

Результати досліджень наведені на рисунку 2.

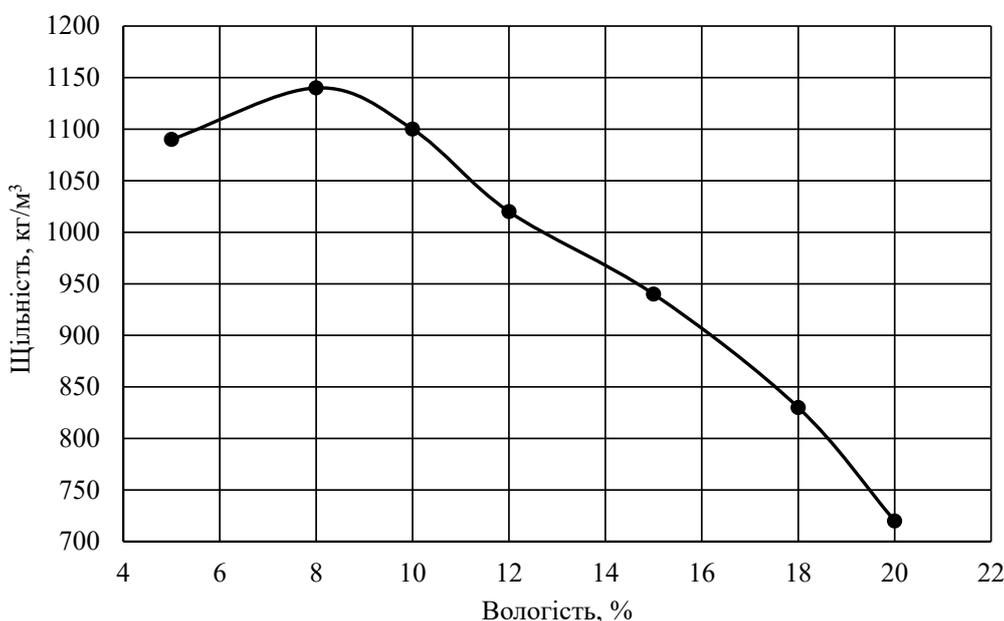


Рис. 2. Залежність щільності паливних брикетів від вологості бадилля картоплі

Встановлено з рис. 2, оптимальна зона вологості для сировини з бадилля картоплі знаходиться в межах 8–12%. У цьому діапазоні відбувається ефективне ущільнення, лігнін працює як природний зв'язуючий компонент, а внутрішня волога сприяє кращому контакту часток. При вологості менше 8% йде зменшення щільності брикетів, а при вологості 5% – брикети утворюються надто ламкі, при виході із преса наявні можливі мікротріщини. В той же час, при вологості 15% і більше брикети погано тримають форму, після охолодження з'являється розшарування та їх руйнування.

Залежність щільності паливних брикетів від вологості бадилля картоплі можна представити наступним виразом:

$$\rho = -2,1342W^2 + 27,147W + 1026,7 \quad (2)$$

де  $\rho$  – щільності паливних брикетів, кг/м³;

$W$  – вологість бадилля картоплі.

Подальші дослідження по визначенню впливу розміру фракцій подрібненого бадилля на щільність паливних брикетів проводились при вологості 12%. Результати досліджень наведені на рисунку 3.

Із графіка (рис. 3) можна зробити висновки, що занадто великі частинки (>8 мм) – призводять до підвищеної пористості, слабкого їх зчеплення, низької щільності й міцності брикету. При розмірах часток <3 мм забезпечують високу щільність, але збільшують опір пресуванню, енерговитрати й зношування матриці. Оптимальна фракція для виготовлення брикетів буде становити 4–6 мм – дає найкраще співвідношення між механічними властивостями та енерговитратами. Приймаємо розмір фракції для брикетування – 5 мм. При цьому розмірі брикети мають достатню щільність (1020 кг/м³) та задовільну цілісність.

Залежність щільності паливних брикетів від ступеню подрібнення бадилля можна представити у вигляді наступного рівняння:

$$\rho = 0,6492l^2 - 66,071l + 1311,1 \quad (3)$$

де  $l$  – розмір фракції, мм.

Дослідження по визначенню впливу тиску пресування на щільність брикетів проводилися при вологості бадилля картоплі 12% та розміру часток після подрібнення 5 мм. Діапазон проведення досліджень був у межах від 40 до 120 МПа (рис. 4).

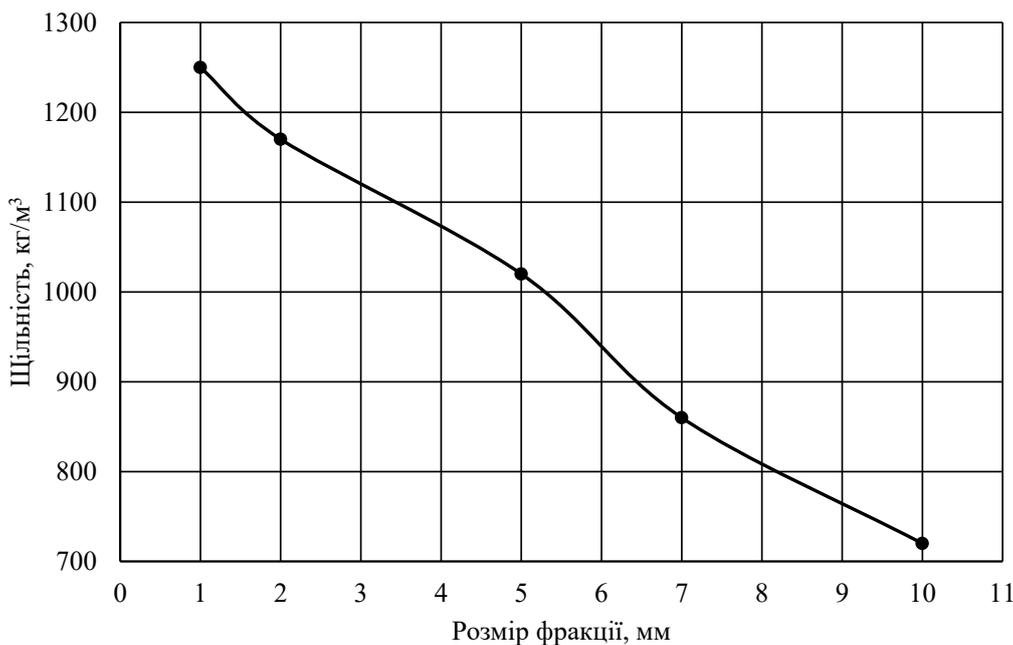


Рис. 3. Залежність щільності паливних брикетів від ступеню подрібнення бадилля картоплі

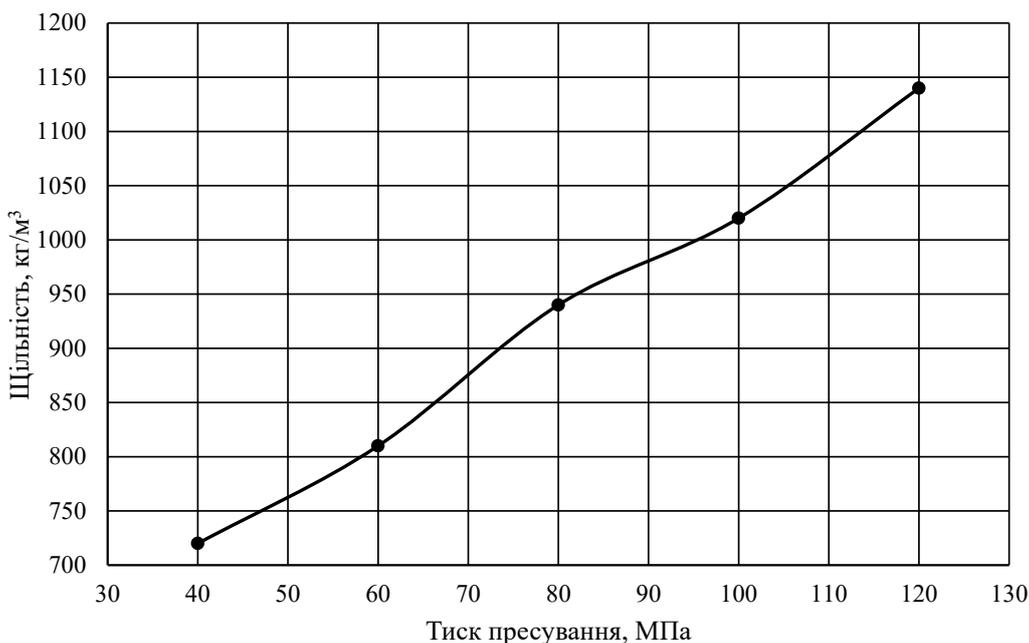


Рис. 4. Залежність щільності паливних брикетів від тиску пресування подрібненого бадилля картоплі

За результатами досліджень видно, що при тиску пресування 40 МПа брикети утворюються слабкі, мають високу пористість, не держать форму. При щільності 60 МПа брикети тримають форму, мають високу пористість, крихкість і низьку транспортабельність. Брикети, що утворилися при тиску пресування 80 МПа мають стійку структуру, оптимальну адгезію частинок, але не високу цілісність. При тиску пресування 100 МПа брикети утворюються із стійкою структурою, високою якістю. Подальше підвищення тиску до 120 МПа забезпечує високу щільність і міцність, але призводить до збільшення енергоспоживання та зносу преса. Тому приймаємо за компроміс «ефективність/енерговитрати» тиск пресування 100 МПа.

Залежність щільності паливних брикетів від тиску пресування наближено можна виразити за допомогою даного рівняння:

$$\rho = 0,0018P^2 + 4,9643P + 516 \quad (4)$$

де  $P$  – тиск пресування, МПа.

### Висновки

Бадилля картоплі є перспективною сировиною для виробництва паливних брикетів. Оптимальними умовами процесу є вологість 8–12%, розмір часток 5 мм та тиск пресування 100 МПа. Реалізація технології дозволить зменшити обсяги аграрних відходів, скоротити викиди парникових газів і підвищити енергетичну незалежність України.

### Список використаної літератури

1. Шпичак О. М., Прокопенко К. О. Проблеми та перспективи розвитку ринку картоплі в Україні з урахуванням економічних викликів // *Економіка та суспільство*. 2020. № 23. Режим доступу: [вставити повне посилання] (дата звернення: [вказати дату]).
2. Міністерство аграрної політики та продовольства України. Основні показники виробництва картоплі в Україні : статистичний звіт. Київ : Мінагрополітики, 2023.
3. FAOSTAT. *Potato Production in Ukraine* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.fao.org/faostat> (дата звернення: 12.11.2025). Назва з екрана.
4. Башмакова Г. П. Використання аграрної біомаси як джерела відновлюваної енергії // *Енергетика та електрифікація*. 2019. № 3. С. 20–25.
5. Geletukha G., Zheliezna T. Bioenergy in Ukraine: Current state and prospects // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2021. Vol. 11, Iss. 4. P. 1545–1558.
6. Гелетуха О. Г., Желiezна Т. А. Потенціал біомаси для енергетики в Україні. Київ : ІТФ НАН України, 2020.
7. Гелетуха О. Г., Башмакова Г. П. Перспективи використання твердого біопалива в Україні // *Вісник НАН України*. 2018. № 10. С. 55–60.
8. Митрофанов В. С. Дослідження характеристик бадилля картоплі для визначення технологічних режимів переробки // *Вісник аграрної науки*. 2016. № 9. С. 80–85.
9. Козак І. І., Литвиненко В. М. Фізичні властивості бадилля картоплі // *Сільськогосподарські машини*. 2017. № 1. С. 15–20.
10. Демко І. В., Морозов О. В., Кузнецов О. В. Оптимізація процесу брикетування відходів соломи в присутності подрібненого лушпиння соняшника // *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2018. Вип. 8, т. 2. С. 27–35. Режим доступу: [вказати повне посилання] (дата звернення: [дата]).
11. Bashmakova H. P. The development of biomass briquetting in Eastern Europe // *Renewable Energy Review*. 2020. Vol. 15. P. 120–135.
12. Das S. K. et al. Potato (*Solanum tuberosum* L.) seed tuber production as influenced by haulm cutting at optimum date [Електронний ресурс] // *CAB Digital Library*. 2020. Режим доступу: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20203573540> (дата звернення: 12.11.2025).
13. Paiziev G. K. Physical and mechanical properties of potato culture (tops and tubers) [Електронний ресурс]. 2021. Vol. 2, Iss. 8. Режим доступу: <https://agir.academiascience.org/index.php/agir/article/download/386/352/725> (дата звернення: 12.11.2025).
14. Kaliyan N., Morey R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products // *Biomass and Bioenergy*. 2009. Vol. 33, Iss. 3. P. 337–359.
15. Marreiro H. M. P. et al. Empirical studies on biomass briquette production: a literature review // *Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 24. P. 8320. DOI: 10.3390/energies14248320.
16. Alaru M. et al. Lignin content and briquette quality of different fibre hemp and energy sunflower plants // *Fuel Processing Technology*. 2011. Vol. 92, Iss. 2. P. 235–240.
17. Comparative analysis of lignocellulosic residues: energy content and ash composition // *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 301. Art. 122780.
18. Лук'яненко О. М., Лук'яненко В. М. Аналіз віброударного пресування рослинної маси з уточненням математичної моделі процесу // *Наукові праці : зб. наук. пр.* Київ : ХНТУ, 2018. Вип. 28. С. 54–61.
19. Семірненко С. Л., Семірненко Ю. І. Брикетування соломи як альтернатива сільськогосподарським спалюванням // *Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства : технічний сервіс машин для рослинництва*. 2013. Вип. 134. С. 271–275.
20. Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets // *Biomass and Bioenergy*. 2006. Vol. 30. P. 648–654.

### References

1. Shpychak, O. M., & Prokopenko, K. O. (2020). Problems and prospects for the development of the potato market in Ukraine considering economic challenges. *Economy and Society*, (23). [URL if available] (in Ukrainian).

2. Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine. (2023). *Statistical report "Main indicators of potato production in Ukraine"*. Kyiv, Ukraine. (in Ukrainian).
3. FAOSTAT. (2025, November 12). *Potato production in Ukraine*. Retrieved from <https://www.fao.org/faostat>
4. Bashmakova, H. P. (2019). Use of agricultural biomass as a source of renewable energy. *Energy and Electrification*, (3), 20–25. (in Ukrainian).
5. Geletukha, G., & Zheliezna, T. (2021). Bioenergy in Ukraine: Current state and prospects. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(4), 1545–1558. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00961-0>
6. Geletukha, O. G., & Zheliezna, T. A. (2020). *Biomass potential for energy in Ukraine*. Kyiv: Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine. (in Ukrainian).
7. Geletukha, O. G., & Bashmakova, H. P. (2018). Prospects for the use of solid biofuels in Ukraine. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (10), 55–60. (in Ukrainian).
8. Mytrofanov, V. S. (2016). Study of the characteristics of potato haulm to determine technological processing modes. *Bulletin of Agricultural Science*, (9), 80–85. (in Ukrainian).
9. Kozak, I. I., & Lytvynenko, V. M. (2017). Physical properties of potato haulm. *Agricultural Machines*, (1), 15–20. (in Ukrainian).
10. Demko, I. V., Morozov, O. V., & Kuznetsov, O. V. (2018). Optimization of the straw waste briquetting process in the presence of crushed sunflower husk. *Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*, 8(2), 27–35. [URL if available] (in Ukrainian).
11. Bashmakova, H. P. (2020). The development of biomass briquetting in Eastern Europe. *Renewable Energy Review*, 15, 120–135.
12. Das, S. K., et al. (2020). Potato (*Solanum tuberosum* L.) seed tuber production as influenced by haulm cutting at optimum date. *CAB Digital Library*. Retrieved from <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20203573540>
13. Paiziev, G. K. (2021). Physical and mechanical properties of potato culture (tops and tubers). *Agricultural Innovations and Research*, 2(8). Retrieved from <https://agir.academiascience.org/index.php/agir/article/download/386/352/725>
14. Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
15. Marreiro, H. M. P., et al. (2021). Empirical studies on biomass briquette production: A literature review. *Energies*, 14(24), 8320. <https://doi.org/10.3390/en14248320>
16. Alaru, M., et al. (2011). Lignin content and briquette quality of different fibre hemp and energy sunflower plants. *Fuel Processing Technology*, 92(2), 235–240. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.09.003>
17. Comparative analysis of lignocellulosic residues: Energy content and ash composition. (2020). *Bioresource Technology*, 301, 122780. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122780>
18. Lukianenko, O. M., & Lukianenko, V. M. (2018). Analysis of vibro-impact pressing of plant mass with clarification of the mathematical model of the process. *Scientific Works: Collection of Scientific Papers*, (28), 54–61. Kyiv: KNTU. (in Ukrainian).
19. Semirnenko, S. L., & Semirnenko, Yu. I. (2013). Straw briquetting as an alternative to agricultural burning. *Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture: Technical Service of Machines for Crop Production*, (134), 271–275. (in Ukrainian).
20. Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2006). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets. *Biomass and Bioenergy*, 30, 648–654. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.01.004>

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025