



УДК 631.363:636.087

DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-3

**РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАЛИВНИХ  
БРИКЕТІВ З РІПАКОВОЇ СОЛОМИ**

**Говоруха Володимир Борисович**, д.ф.-м.н., професор  
Дніпровський державний аграрно-економічний університет  
**Луц Павло Михайлович**, к.т.н., старший викладач  
Вінницький національний аграрний університет  
**Кисельов Олексій Васильович**, к.т.н.

**Volodymyr Govorukha**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor  
Dnipro State Agrarian and Economic University  
**Pavlo Luts**, Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer  
Vinnytsia National Agrarian University  
**Oleksii Kyselov**, Candidate of Technical Sciences

*При виготовленні паливних брикетів основним матеріалом, що використовується для пресування, є відходи АПК, зокрема рослинні залишки, які найчастіше представляють собою солому злакових та дрібнонасінних культур. Тому успішність процесу брикетування в значній мірі залежить від властивостей їх фізико-механічної компоненти.*

*У межах варіювання досліджуваних факторів із зменшенням середньої довжини частинок соломи ріпаку підвищується щільність та енергетична щільність брикетів. Позитивно впливають на ці показники також зростання вмісту зв'язуючого (глини або гною), кута конуса матриці та відношення площі перерізу каналу матриці до його периметру. Збільшення вологості матеріалу, що пресується, веде до зростання щільності брикетів і зниження їх енергетичної щільності.*

*Для забезпечення одержання брикетів щільністю понад 600 кг/м<sup>3</sup> як із зв'язуючої речовиною, так і без неї необхідно застосовувати круглу матрицю.*

*Оптимальною температурою нагрівання матриці в процесі пресування є 160–180° С. При цьому відбувається виділення лігніну із ріпакової соломи, який також служить зв'язуючою речовиною, крім того вона краще пластифікується, прискорюючи релаксаційні процеси, зменшуються коефіцієнти тертя, знижується енергоємність процесу та забезпечується можливість отримання необхідної якості брикетів.*

*При пресуванні з температурою нагрівання до 160–180° С відбувається стійке отримання брикетів із соломи ріпаку з вологістю вихідного матеріалу до 16 %, причому, у разі подрібнення її до частинок 20 мм брикетування може виконуватися без внесення зв'язуючої речовини.*

*Найбільш прийнятна вихідна вологість маси, що брикетується, 8–12 %, при більшій брикети виходять пухкими, при меншій вони виходять менш щільними. При вологості понад 16 % відбувається інтенсивне утворення пари в камері пресування, що є небезпечним у роботі.*

**Ключові слова:** паливні брикети, рослинні матеріали, пресування, тиск, матриця, щільність, довжина частинок, вологість, конструктивні параметри, план Бокса, рівняння регресії.

**Ф. 7. Рис. 4. Табл. 2. Літ. 14.**

---

**1. Постановка проблеми**

При виготовленні брикетів важливо враховувати, що пресована суміш може складатися з різних компонентів, що мають різне походження та структуру з різноманітними фізико-механічними властивостями. Такі властивості, як пружність, в'язкість та фракційний склад матеріалів, що піддаються пресуванню, мають значний вплив на процес брикетування [1-5].

Вчені відзначають, що фізико-механічні властивості пресованих матеріалів не є сталими і виявляються різними залежно від різних факторів, що ускладнює їх врахування в фізико-математичних моделях. Серед найважливіших з таких факторів можна виділити температуру, вологість, фракційний склад, а також вміст та вид зв'язуючих компонентів [6, 7].

Для досягнення якісних брикетів, включаючи брикети з необхідною крихкістю, що є важливим показником їх якості, вирішальну роль відіграють перелічені параметри, які визначають стан



пресованої суміші. Поєднання цих параметрів з конструктивними характеристиками преса та режимами його роботи допомагає отримати якісні брикети при високій продуктивності та низькому енергоспоживанні процесу. Тому важливо знайти оптимальну комбінацію цих факторів.

## 2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Одним із недоліків при використанні відходів АПК як палива є їх низька енергетична щільність: тому їх зберігання та спалювання в розсипному вигляді не економічне і вимагає значних витрат ручної праці [8].

Для оцінки придатності використання різних видів рослинних матеріалів як паливо необхідно провести комплексні лабораторні дослідження та визначити якісні характеристики одержуваних брикетів.

Брикетування паливних матеріалів – це процес підвищення їх щільності шляхом пресування (ущільнення) в замкнутому просторі під впливом зовнішнього тиску до отримання брикетів необхідної енергетичної щільності [9]. Брикет повинен мати розміри, масу і міцність, зручні для подальшого транспортування, зберігання та використання, а також потрібну теплоту згоряння [9].

Основна характеристика процесу брикетування – залежність між збільшенням тиску пресування та щільністю [10]. Маса при брикетуванні не тільки чинить опір стиску, але після зняття тиску прагне знову розширитися під дією сил релаксації.

Аналіз закономірностей, представлених в [11] показує, що один з коефіцієнтів, що характеризують розширення пресованого матеріалу, виявлений таким, що не залежить від тривалості навантаження і від щільності матеріалу. У той самий час реологічні властивості стеблових матеріалів свідчать про вплив цих чинників. Визначення згаданих закономірностей дуже важливе для штемпельних пресів, у яких відсутня витримка брикетів під постійним тиском, а сама щільність змінюється у часі [12].

Тому тільки комплексне дослідження впливу питомого тиску, фракційного складу, вологості, температури, тривалості витримки спресованої маси під тиском, виду і кількості сполучного на якісні показники процесу виробництва брикетів дозволяють визначати необхідні конструктивно-технологічні параметри та режими роботи преса.

## 3. Мета та завдання досліджень

Метою досліджень є обґрунтування режимів виготовлення паливних брикетів з соломи ріпаку. У процесі лабораторних досліджень необхідно вирішити такі завдання:

- виявити основні закономірності впливу основних фізико-механічних та технологічних властивостей брикетованого матеріалу та конструктивно-технологічних параметрів та режимів роботи на енергетико-технологічні показники брикетів;
- визначити конструктивні параметри, що забезпечують брикетування ріпакової соломи з використанням зв'язуючих речовин і без них;
- встановити оптимальні режими отримання брикетів, необхідні розробки конструктивної схеми, параметрів і режимів роботи прес-брикетувальника;
- оцінити якість горіння брикетів, вихід летких речовин.

## 4. Матеріали і методи досліджень

При аналізі брикетів як палива визначається кількість загальної вологи, зольність, вихід летких речовин та питома теплота згоряння.

Виходячи з мети та завдань прийнята наступна програма досліджень впливу основних технологічних та конструктивних параметрів на щільність брикетів та їх енергетичну щільність: вологості матеріалу; фракційного складу; геометрії камери матриці (круглий, квадратний та прямокутний переріз з різними кутами конусності); виду та вмісту сполучної речовини. Енергетична щільність є відношенням питомої теплоти згоряння до щільності:

$$E = C_6 / \rho, \quad (1)$$

де  $C_6$  – питома теплота згоряння,  $\rho$  – щільність брикетів.

При лабораторних дослідженнях використовувалася універсальна випробувальна машина 2055 P-0,5, призначена для проведення випробувань зразків на стиснення і розрив.

Для формування брикету були застосовані матриці, що складаються з двох частин: попередньої камери пресування з різними перерізами – круглим діаметром 70 мм, квадратним зі стороною 62 мм і прямокутним з розміром сторін 36×106 мм, кутами конуса 2,486° (1:20), 4,294° та 5,724° (1:10) та камери пресування довжиною 150 мм. Матриця вставляється в термоізоляційну камеру з електронагрівом та контролем температури. В матриці здійснюється їх нагрівання до заданої



температури, яка застосовується при дослідженнях. Відношення площі перерізу каналу до периметру (при одиничному діаметрі) відповідно дорівнюють 0,1932, 0,2216 та 0,25.

Вона дозволяє розвивати зусилля до 5 кН за плавної зміни швидкості робочого ходу рухомої траверси від 1 до 1000 мм/хв.

Змінюваними параметрами, що впливають на технологічний процес виробництва паливних брикетів при лабораторних дослідженнях є початкова величина вологості брикетів і ступінь подрібнення маси, вид і вміст зв'язуючої речовини, форма і конусність матриці.

Для проведення досліджень використовувалася ріпакова солома, яка подрібнювалася до середньої величини, необхідної для кожної партії експериментів, передбаченої методикою досліджень, тобто 20, 30 та 40 мм із забезпеченням в кожній партії не менше 80 % заданого розміру частинок.

При дослідженнях впливу вологості її величина приймається 8, 12 і 16 %, тому що з літературних джерел встановлено, що при вологості нижче 8 % брикети розсипаються, а при більш ніж 16 % – виходять розірвані (пухкі).

Вихідна вологість ріпакової соломи повинна бути узгоджена із вмістом та вологістю сполучного дотриманням умови:

$$w - w_c + \delta (w - w_r) / (1 - \delta) > 0, \quad (2)$$

де  $w$  – одержувана вологість маси;  $w_c$  – вихідна вологість соломи ріпаку;  $w_r$  – вихідна вологість зв'язуючої речовини;  $d$  – зміст сполучного.

Величини вологостей ріпакової соломи та зв'язуючої речовини визначались за загальноприйнятими методиками у хімічній лабораторії.

Постійним параметром, встановленим раніше, є температура нагріву матриці від 160° до 180° С, яка забезпечує максимальну щільність брикету за рахунок сполучних властивостей лігніну соломи ріпаку, так як при більш високій температурі вона починає чорніти та обвуглюватись.

В якості зв'язуючої речовини застосовувалася глина або гній великої рогатої худоби з вологістю 45–53 % у кількості 4,5 і 9 % від маси паливного брикету.

Таким чином, згідно з методикою лабораторних досліджень необхідно виконати визначення взаємного впливу п'яти основних конструктивних та технологічних параметрів.

Варіювання факторів на трьох рівнях для опису поверхнями поліномів другого порядку створює сприятливі умови при розробці експериментальних зразків, спрощуючи та здешевлюючи їх конструкцію, скорочує обсяг та час проведення експериментів, дозволяє підвищити точність результатів досліджень [13].

Інтервали та рівні варіювання факторів, прийнятих при дослідженнях, наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Інтервали та рівні варіювання факторів

Рівень	Фактори та їх позначення				
	Середня довжина часток $l$ , мм	Вміст зв'язуючої речовини $\delta$ , %	Кут конуса матриці $\alpha$ , град	Вологість вихідного матеріалу $\omega$ , %	Відношення перерізу каналу до периметра $k_f$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
Верхній (+1)	40	9,0	5,724	16	0,2500
Основний (0)	30	4,5	4,294	12	0,2216
Нижній (-1)	20	0,0	2,864	8	0,1932
Інтервал	10	4,5	1,430	4	0,0284

З метою опису досліджуваних закономірностей поверхнями відгуку, представленими поліномами другого порядку, приймається трирівнева матриця оптимального плану Бокса для п'яти факторів [13].

Загалом дослідження брикетів з ріпакової соломи виконувалися за методикою і на устаткуванні, описаними в дисертації Романа Бакарджиева [14].

## 5. Виклад основного матеріалу

Лабораторні дослідження енергетичної щільності та щільності брикетів з ріпакової соломи і гною ВРХ або глиною як сполучне, виконувались за трирівневою матрицею оптимального плану Боксу для п'яти факторів.

Показники процесу та якості брикетів при використанні у вигляді зв'язуючих глини та гною



практично не відрізнялися. У результаті обробки даних отримані поліноми другого порядку – рівняння регресії, що описують поверхні відгуку:

– енергетичної щільності брикетів:

$$E = -31,471 + 0,619 l - 1,054 \alpha + 241,2 k_f - 0,0071 \delta + 0,0131 \alpha - 0,782 l k_f - 0,01 l^2 + 0,06 \delta^2 + 0,008 \alpha^2 - 411,31 k_f^2; \quad (3)$$

– щільність брикетів:

$$\rho = -1615,552 + 60,088 l - 42,106 \delta - 127,072 \alpha + 11419,674 k_f - 0,6011 \delta - 0,901 l^2 + 4,721 \delta^2 + 5,347 \alpha^2 + 0,433 \omega^2 - 18335,714 k_f^2. \quad (4)$$

Мінімальне значення функції відгуку енергетичної щільності брикетів, що знаходиться в точці з координатами  $l = 40$  мм,  $\delta = 5,23$  %,  $\alpha = 2,864$  °,  $\omega = 16$  % і  $k_f = 0,25$  (круглий переріз), дорівнює  $2,86$  ГДж/м<sup>3</sup>; максимальне, розташоване в точці  $l = 11,8$  мм,  $\delta = 9$  %,  $\alpha = 5,725$  °,  $\omega = 8$  % і  $k_f = 0,1932$ , становить  $11,34$  ГДж/м<sup>3</sup>.

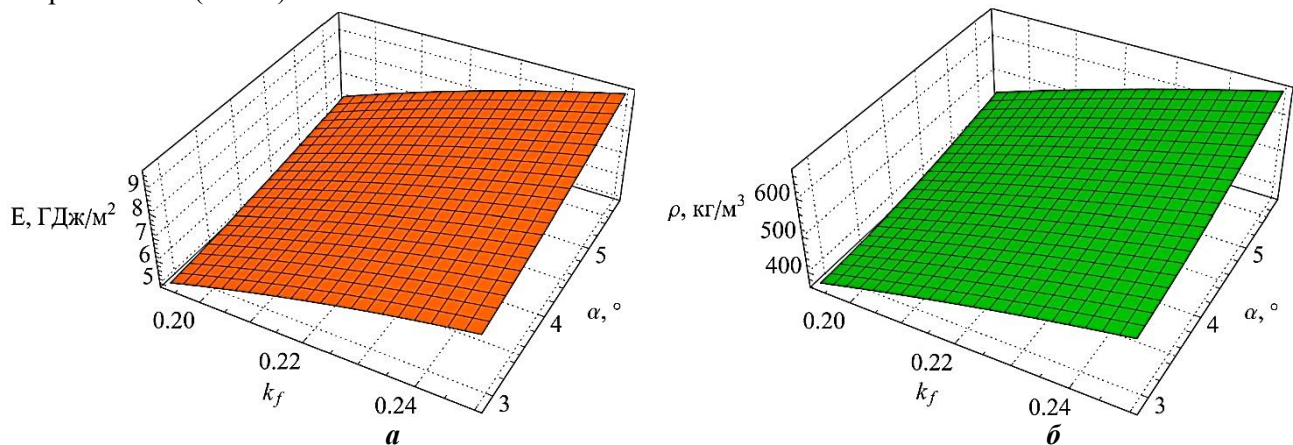
Для аналізу взаємного впливу досліджуваних конструктивних факторів – кута конуса матриці та її форми використовується метод аналізу їх парних взаємодій за допомогою двовимірних перерізів.

Рівняння двовимірного перерізу енергетичної щільності брикетів (ГДж/м<sup>3</sup>) та щільності брикетів (кг/м<sup>3</sup>) для парних взаємодій кута конуса  $\alpha$  та відношення перерізу каналу до периметру  $k_f$  при нульових рівнях інших факторів має вигляд:

$$E = -14,017 + 143,678 k_f - 1,021 \alpha + 4,644 \alpha k_f - 239,834 k_f^2 + 0,06 \alpha^2; \quad (5)$$

$$\rho = -492,707 + 6599,879 k_f - 101,429 \alpha + 319,63 \alpha k_f - 9901,385 k_f^2 + 7,793 \alpha^2. \quad (6)$$

Підстановкою різних значень у рівняння (5) та (6) будуються сімейства кривих рівної енергоемності (Рис. 1).



**Рис. 1. Парні взаємодії впливу конуса  $\alpha$  та форми матриці  $k_f$  при ступені подрібнення соломи ріпаку 20 мм, вміст зв'язуючого (глини) 4,5 % та вологості 12 % на енергетичну щільність (а) та щільність брикетів (б)**

Аналіз цих малюнків показує, що збільшення кута конуса матриці викликає зростання щільності брикету (рис. 2, б) та його енергетичної щільності (рис. 2, а). Це відбувається внаслідок зростання зусилля, що потрібне для проштовхування брикету по каналу матриці. Більшою мірою їх збільшення впливає форма перерізу каналу. Зі збільшенням відношення площі перерізу каналу до його периметру (з наближенням до кола), щільність брикетів збільшується, так як ущільнена маса, більш рівномірно розподіляється по перерізу камери.

Проведені дослідження показали, що ріпакова солома вологістю вище 12 % дає брикети недостатньої щільності, хороша їх якість досягається при внесенні в солому глини або гною вологістю 45–53 % у кількості 4,5–9,0 % загальної маси брикету. При такій вологості соломи, кількості сполучних, що вносяться, і температурі нагріву матриці конусністю 1:10–1:20 до температури 160–180° С необхідний питомий тиск лежить в межах 4,50–4,75 МПа при експозиції пресування 1–1,5 хв. Щільність одержаних брикетів досягала при цьому понад 700 кг/м. Загальний вид брикетів, отриманих на лабораторній установці, представлений на рис. 2.





a



б



в



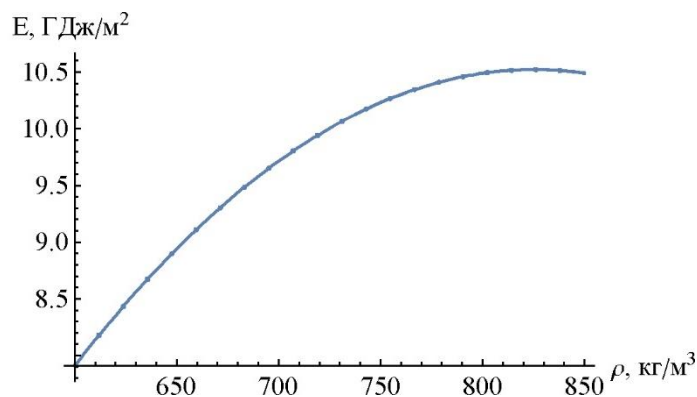
г

**Рис. 2. Загальний вид брикетів, одержаних на лабораторній установці:**  
а) – у квадратній матриці; б), в), г) – у круглій, відповідно з кутами конуса 2,486° (1:20) ,  
4,294° та 5,724° (1:10)

Отримана функціональна залежність енергетичної щільності від щільності брикетів, представлена виразом (7), представлена на рис. 3.

$$E = -24,55 + 8,5 \times 10^{-2} \rho - 5,15 \times 10^{-5} \rho^2 \quad (7)$$

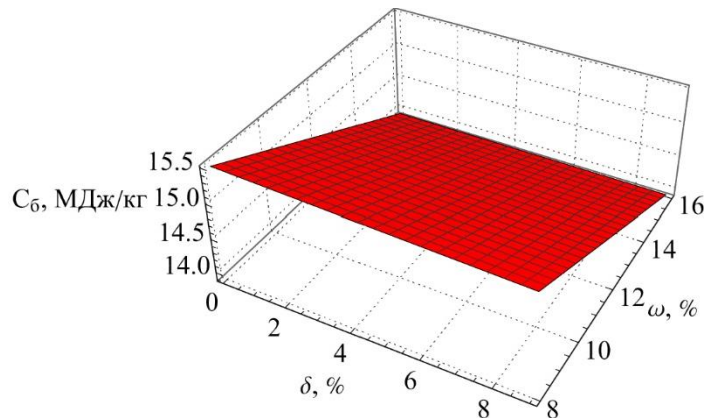
Такий вид кривої (перекинута парабола) пояснюється тим, що енергетична щільність брикетів є лінійною функцією від їх щільності, яка у свою чергу є параболічною залежністю від вмісту зв'язуючої речовини (1).



**Рис. 3. Залежність енергетичної густини E від густини брикету ρ**

У свою чергу питома теплота згоряння брикету  $C_6$  також залежить від вологості  $\omega$  та вмісту зв'язуючої речовини  $\delta$ . При використанні для брикету з ріпакової соломи глини як наповнювач залежність теплоти згоряння (МДж/кг) від його вмісту та вологості брикету в межах варіювання цих величин, розрахованих для значень згідно з тривірневим двофакторним планом Бокса (B2), описується рівнянням (Рис. 4):

$$C_6 = 17,08 - 0,0289 \delta - 0,1975 \omega + 0,0017 \delta \omega. \quad (8)$$



**Рис. 4. Парні взаємодії впливу вмісту сполучного (глини)  $\delta$  та вологості брикету  $\omega$  на питому теплоту згоряння  $C_b$**

Для досліджень придатності брикетів з ріпакової соломи як виду палива було проведено їх спалювання, визначення золи та виходу летких речовин (табл. 2).

**Таблиця 2**

**Результати спалювання паливних брикетів**

Склад брикетів	Сухі речовини, %	Зола, %	Летючі речовини, %
Солома ріпаку	92,32	5,08 / 5,50	73,43 / 79,54
Соняшникова лушпиння	93,46	3,06 / 3,27	72,01 / 77,05
Солома ріпаку та 4.5 % гною	93,93	5,94 / 6,36	16,53 / 17,71
Солома ріпаку та 4.5 % глини	81,97	11,19 / 13,05	18,93 / 23,09

З даних табл. 2 видно, що брикети із соломи ріпаку, соняшникового лушпиння і ріпакової соломи із зв'язуючої речовиною у вигляді гною дають менше золи і більше летких речовин, ніж солома із зв'язуючої речовиною у вигляді глини. Зола завжди мала гарну крихкість. Питома теплота згоряння брикетів через відсутність калориметричної бомби визначалася побічно, тобто за часом згоряння та зольності. Чим менша зольність, тим вище питома теплота згоряння речовини. Для досліджуваних брикетів вона лежить у межах 11,3–14,2 МДж/кг.

**6. Висновки**

На підставі виконаних лабораторних досліджень брикетування рослинних матеріалів для використання їх як енергоносія для виробничих та побутових потреб, можна зробити такі висновки:

1. У межах варіювання досліджуваних факторів із зменшенням середньої довжини частинок соломи ріпаку підвищується щільність та енергетична щільність брикетів. Позитивно впливають на ці показники також зростання вмісту сполучного (глини або гною), кута конуса матриці та відношення площі перерізу каналу матриці до його периметру. Збільшення вологості матеріалу, яке ущільнюється веде до зростання щільності брикетів і зниження їх енергетичної щільності.

2. Для забезпечення одержання брикетів щільністю понад 600 кг/м<sup>2</sup>, як із зв'язуючою речовиною, так і без неї необхідно застосовувати круглу матрицю.

3. Оптимальною температурою нагріву матриці в процесі пресування є 160–180° С. При цьому відбувається виділення лігніну із ріпакової соломи, який служить зв'язуючою речовиною, крім того вона краще пластифікується, прискорюються релаксаційні процеси, зменшуються коефіцієнти тертя, знижується енергоємність процесу та забезпечується можливість отримання необхідної якості брикетів.

4. При пресуванні з температурою нагрівання до 160–180° С відбувається стійке отримання брикетів із соломи ріпаку з вологістю вихідного матеріалу до 16 %, причому, у разі подрібнення її до часток 20 мм брикетування може проводитися без внесення зв'язуючої речовини.

5. Найбільш прийнятна вихідна вологість брикетованої маси 8–12 %, при більшій брикети виходять пухкими, при меншій – менш щільними. При вологості понад 16 % відбувається інтенсивне утворення пари в камері пресування, що є небезпечним у роботі.



## Список використаних джерел

1. Chen S., Zhao Y., Tang Z., Ding H., Su Z., Ding Z. Structural Model of Straw Briquetting Machine with Vertical Ring Die and Optimization of Briquetting Performance. *Agriculture*. 2022. Vol. 12 (5), 736 p. DOI: 10.3390/agriculture12050736
2. Алієв Е. Б., Пацула О. М., Гриценко В. Т. Технологія комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива. *Науково-методичні рекомендації. Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. Електронний аналог друкованого видання (електронна книга)*. Запоріжжя. 2017. ISBN 978-617-7353-59-0
3. Sengar S. H., Mohod A. G., Khandetod Y. P., Patil S. S., Chendake A. D. Performance of Briquetting Machine for Briquette Fuel. *International Journal of Energy Engineering*. 2012. Vol. 2 (1). P. 28–34. DOI: 10.5923/j.ijee.20120201.05
4. Grover P. D., Mishra S. K. Biomass Briquetting: Technology and Practices. *Regional Wood Energy Development Programme In Asia Gcp/Ras/154/Net. Field Document*. 1996. Vol. 46. P. 43. URL: <https://www.fao.org/3/ad579e/ad579e00.pdf>
5. Wang F. H., Tian Z. Y. The Virtual Design of Cluster Straw Fuel Briquetting Machine. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 299–300. P. 925–928. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.299-300.925
6. Алієв Е. Б., Пацула О. М., Гаврильченко О. С. Результати експериментальних досліджень установки для виготовлення паливних брикетів з лушпинної фракції макух насіння олійних культур. *Технічні системи і технології тваринництва: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2016. № 170. С. 3–7.
7. Алієв Е. Б., Яропуд В. М., Гаврильченко О. С., Іванченко О. В., Пацула О. М. Установка для виготовлення паливних брикетів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. № 4 (103). С. 69–74.
8. Berdychowski M., Wilczyński D., Wałęsa K., Górecki J. Research on the compaction process of loose materials with use of helix technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 776. P. 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/776/1/012063
9. Marreiro H. M. P., Peruchi R. S., Lopes R. M. B. P., Andersen S. L. F., Eliziário S. A., Rotella Junior P. Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. *Energies*. 2021. Vol. 14 (24). P. 8320. DOI: 10.3390/en14248320
10. Kpalo S. Y., Zainuddin M. F., Manaf L. A., Roslan A. M. A Review of Technical and Economic Aspects of Biomass Briquetting. *Sustainability*. 2020. Vol. 12 (11). P. 4609. DOI: 10.3390/su12114609
11. Долгов І. А. Закономірності стиснення сіно-соломистих матеріалів. Механізація і електрифікація сільського господарства. Київ. 1972. С. 8–11.
12. Кисельов О. В., Бакарджієв Р. О. Вибір типу прес-брикетувальника і його кінематичний аналіз. *Збірник праць III Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання»*. Мелітополь. 1996.
13. Кисельов, О. В., Комарова, І. Б., Мілько, Д. О., Бакарджієв Р. О. Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт). Навчальний посібник. За заг. ред. Д.О. Мілька. Інститут механізації тваринництва НААН. Запоріжжя. 2017. 1181 с.
14. Бакарджієв Р. О. Обґрунтування конструктивних параметрів і режимів роботи прес-брикетувальника для утилізації рослинних матеріалів : дис. канд. техн. уаук : 05.20.01 / Таврійська державна агротехнічна академія. Мелітополь. 1997. 168 с.

## References

- [1]. Chen, S., Zhao, Y., Tang, Z., Ding, H., Su, Z., Ding, Z. (2022). Structural Model of Straw Briquetting Machine with Vertical Ring Die and Optimization of Briquetting Performance. *Agriculture*, 12 (5), 736. DOI: 10.3390/agriculture12050736 [in English]
- [2]. Aliev, E.B., Patsula, O.M., Hrytsenko, V.T. (2017). *Tekhnolohiia kompleksnoi bezvidkhidnoi pererobky makukhy z nasinnia oliinykh kultur z otrumanniam vysokoikakhsnykh povnotsinnykh proteinovyykh dobavok u vyhlyadi pellet ta tverdoho biopalyva*. Naukovo-metodychni rekomendatsii. Instytut oliinykh kultur Natsionalnoi akademii ahrarnykh nauk Ukrainy. Elektronnyi analoh drukovanoho vydannia (elektronna



- knyha). Zaporizhzhia. ISBN 978-617-7353-59-0 [in Ukrainian]
- [3]. Sengar, S.H., Mohod, A.G., Khandetod, Y.P., Patil, S.S., Chendake, A.D. (2012). Performance of Briquetting Machine for Briquette Fuel. *International Journal of Energy Engineering*, 2 (1), 28–34. DOI: 10.5923/j.ijee.20120201.05 [in English]
- [4]. Grover, P.D., Mishra, S.K. (1996). *Biomass Briquetting: Technology and Practices*. Regional Wood Energy Development Programme In Asia Gcp/Ras/154/Net. Field Document, 46. URL: <https://www.fao.org/3/ad579e/ad579e00.pdf> [in English]
- [5]. Wang, F.H., Tian, Z.Y. (2011). The Virtual Design of Cluster Straw Fuel Briquetting Machine. *Advanced Materials Research*, 299–300, 925–928. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.299-300.925 [in English]
- [6]. Aliiev, E.B., Patsula, O.M., Havrylchenko, O.S. (2016). Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen ustanovky dlia vyhotovlennia palivnykh bryketiv z lushpynnoi fraktsii makukh nasinnia oliinykh kultur. *Tekhnichni systemy i tekhnolohii tvarynnytstva: Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*, 170, 3–7. [in Ukrainian]
- [7]. Aliev, E.B., Yaropud, V.M., Havrylchenko, O.S., Ivanchenko, O.V., Patsula, O.M. (2018). Ustanovka dlia vyhotovlennia palivnykh bryketiv. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 4 (103). 69–74. [in Ukrainian]
- [8]. Berdychowski, M., Wilczyński, D., Wałęsa, K., Górecki, J. (2020). Research on the compaction process of loose materials with use of helix technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 776, 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/776/1/012063 [in English]
- [9]. Marreiro, H.M.P., Peruchi, R.S., Lopes, R.M.B.P., Andersen, S.L.F., Eliziário, S.A., Rotella Junior P. (2021). Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. *Energies*, 14 (24), 8320. DOI: 10.3390/en14248320 [in English]
- [10]. Kpalo, S.Y., Zainuddin, M.F., Manaf, L.A., Roslan, A.M. (2020). A Review of Technical and Economic Aspects of Biomass Briquetting. *Sustainability*, 12 (11), 4609. DOI: 10.3390/su12114609 [in English]
- [11]. Dolgov, I.A. (1972). *Zakonomirnosti stysnennia sino-solomistykh materialiv*. Mekhanizatsiia i elektrifikatsiia silskoho hospodarstva. Kyiv. [in Ukrainian]
- [12]. Kyselov, O.V., Bakardzhiiev, R.O. (1996). Vybir typu pres-bryketuvalnyka ta yoho kinematychnyi analiz. *Zbirnyk prats III Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii "Suchasni problemy heometrychnoho modeliuвання"*. Melitopol. [in Ukrainian]
- [13]. Kyselov, O.V., Komarova, I.B., Milko, D.O., Bakardzhiiev R.O. (2017). Statystychna obrobka i oformlennia rezultativ eksperymentalnykh doslidzhen (iz dosvidu napisannia dysertatsiinykh robit). *Navchalnyi posibnyk. Za zah. red. D.O. Milka. Instytut mekhanizatsii tvarynnytstva NAAN. Zaporizhzhia*. [in Ukrainian]
- [14]. Bakardzhiiev, R.O. (1997). Obgruntuvannia konstruktyvnykh parametrov i rezhymiv roboty presbrekeruvalnyka dlia utylizatsii roslynnykh materialiv: dys. kand. tekhn. nauk: 05.20.01 / Tavriiska derzhavna ahrotekhnichna akademiia. Melitopol. [in Ukrainian]

## RESULTS OF LABORATORY STUDIES ON THE PROCESS OF MAKING FUEL BRIQUETTES FROM RAPESEED STRAW

When producing fuel briquettes, the main material used for pressing is agricultural waste, specifically plant residues, which most often consist of straw from cereal and small-seeded crops. Therefore, the success of the briquetting process largely depends on the properties of their physico-mechanical component.

Within the variation of the studied factors, as the average length of rapeseed straw particles decreases, the density and energy density of the briquettes increase. Also positively affecting these indicators are the increase in the content of binding material (clay or manure), the cone angle of the matrix, and the ratio of the cross-sectional area of the matrix channel to its perimeter. Increasing the moisture content of the pressed material leads to an increase in the density of briquettes and a decrease in their energy density.

To ensure the production of briquettes with a density of over 600 kg/m<sup>3</sup>, both with and without binding material, a round matrix should be used.

The optimal temperature for heating the matrix during pressing is 160-180°C. This results in the release of lignin from rapeseed straw, which also acts as a binding agent. Furthermore, it enhances





*plasticization, accelerating relaxation processes, reducing friction coefficients, lowering the energy intensity of the process, and enabling the achievement of the required briquette quality.*

*Pressing at a heating temperature of 160-180°C leads to stable production of rapeseed straw briquettes with a moisture content of the initial material of up to 16%. In the case of particle size reduction to 20 mm, briquetting can be performed without adding a binding agent.*

*The most acceptable initial moisture content of the briquetting mass is 8-12%. Higher moisture results in fluffy briquettes, while lower moisture leads to less density. With moisture exceeding 16%, intensive steam formation occurs in the pressing chamber, which is dangerous during operation.*

**Key words:** *fuel briquettes, plant materials, pressing, pressure, matrix, density, particle length, moisture, structural parameters, Box's plan, regression equation.*

**F. 7. Fig. 4. Table. 2. Ref. 14.**

#### **ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ**

**Говоруха Володимир Борисович** – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики, фізики та загальноінженерних дисциплін Дніпровського державного аграрно-економічного університету (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49600, e-mail: govorukhavb@yahoo.com <https://orcid.org/0000-0002-0936-9272>).

**Луц Павло Михайлович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: luts@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3776-8940>).

**Кисельов Олексій Васильович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник (м. Запоріжжя, вул. Південноукраїнська, буд. 15, кв. 31, Україна, 69035, e-mail: awbakis@gmail.com).

**Volodymyr Govorukha** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of higher mathematics, physics and general engineering disciplines of Dnipro State Agrarian and Economic University (25 Serhiy Yefremova St., Dnipro, Ukraine, 49600, e-mail: govorukhavb@yahoo .com).

**Pavlo Luts** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of machines and equipment of agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: luts@vsau.vin.ua).

**Oleksii Kyselov** – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher (Zaporizhia, St. Pivdennoukrainska, bldg. 15, sq. 31, Ukraine, 69035, e-mail: awbakis@gmail.com).