

**Говоруха В.Б.**

д.ф.-м.н., проф.

*Дніпровський державний  
аграрно-економічний  
університет***Луц П.М.**

к.т.н.

*Вінницький національний  
аграрний університет***Кисельов О.В.**

к.т.н., с.н.с.

*Інститут механізації  
тваринництва  
Національної академії  
аграрних наук України***Govorukha V.**Doctor of Physical and  
Mathematical Sciences, Prof.*Dnipro State Agrarian and  
Economic University***Luts P.**

Ph.D. of Engineering

*Vinnitsia National Agrarian  
University***Kiselyov O**Ph.D. of Engineering, Senior  
Researcher*Institute of Mechanization  
of Animal Husbandry of  
National Academy of  
Agrarian Sciences of  
Ukraine***УДК 631.363:636.087****DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-8****ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА  
МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ  
ПРЕСУВАННЯ ПАЛИВНИХ  
БРИКЕТІВ З РОСЛИННИХ  
МАТЕРІАЛІВ**

У процесі утворення брикету стискання характеризується зміною щільності, тобто відбувається процес перекладу суцільного середовища, що має властивості сипучого матеріалу і має складну трифазну систему, яка складається з природних полімерів, сорбованої вологи, повітря і частинки різної форми і розміру в суцільне тверде середовище з властивостями моноліту заданої форми і розміру. У ньому зв'язок між частинками характеризується силами Ван-дер-Ваальса та Лапласа. Цей процес різні дослідники описують різними емпіричними формулами, які ґрунтуються на врахуванні відповідних фізико-механічних та технологічних властивостей пресованих матеріалів та їх окремих компонентів.

Розглянуті в статті рослинні матеріали, що є вторинними продуктами агропромислового комплексу, мають специфічні фізико-механічні властивості. В наслідок цього за мету досліджень запропоновано розробка фізико-математичної моделі процесу пресування паливних брикетів з рослинних матеріалів дрібно насінневих та злакових культур.

В результаті аналізу літературних джерел виявлено, що фізико-механічні властивості пресованих матеріалів, що визначаються фракційним складом, вологістю, температурою пресування, видом і умістом зв'язуючої речовини. Ці показники впливають як на енергетичні показники процесу, так і на якісні показники брикетів.

Багатокомпонентність різних за природою, походженням та структурою матеріалів тягне за собою і розширення різноманітності фізико-механічних властивостей, що повинні бути враховані. Розглянуто та враховано вплив пружних, в'язких та фрикційних властивостей обраних для пресування матеріалів.

Розроблена фізико-математична модель процесу пресування паливних брикетів з рослинних матеріалів, що дозволяє визначати кінцеву щільність матеріалу, що враховує особливості брикетування за допомогою штемпельного преса з кривошипно-шатунним механізмом.

Встановлено, що параметри та режими роботи штемпельного прес-брикетувальника з кривошипно-шатунним механізмом взаємопов'язані між собою і фізико-механічними та технологічними властивостями пресованого матеріалу.

**Ключові слова:** паливні брикети, рослинні матеріали, пресування, тиск, навантаження, щільність, фізико-математична модель, властивості, параметри.



**Вступ.** При виготовленні паливних брикетів об'єктом пресування виступають відходи АПК, зокрема рослинництва, найчастіше солома злакових і дрібнонасінневих культур, тому ефективність процесу брикетування у вирішальній мірі залежить від фізико-механічних ущільнюваних матеріалів [1, 2].

Так як пресована суміш може складатися з декількох компонентів, різних за природою походження та структурою з дуже різноманітними фізико-механічними властивостями, на процес брикетування істотно впливають пружні, в'язкі та фрикційні властивості матеріалів, що пресуються. До них відносяться модуль пружності першого роду (модуль Юнга), коефіцієнт Пуассона, коефіцієнти в'язкості, тертя та бічного тиску [3, 4].

Велику роль відіграють порізність матеріалу, співвідношення фазових складових, період релаксації та коефіцієнт пружного розширення. У ряді випадків при дослідженнях враховувалися: точка адсорбції води на поверхні частинок, критична густина, теплоємність, теплопровідність, а також специфічні властивості, пов'язані зі способами застосування навантаження [5].

Дослідники відзначають, що фізико-механічні властивості пресованих матеріалів не постійні і по-різному проявляють себе залежно від різних факторів, тому їх врахування в фізико-математичних моделях утруднено. До найважливіших з них відносять температуру, вологість, фракційний склад, вміст та вид зв'язуючих компонентів [6, 7].

Перелічені параметри визначають стан пресованої суміші. Тому необхідно знайти таке їх оптимальне поєднання, яке спільно з конструктивними параметрами і режимами роботи преса забезпечує отримання якісних брикетів, у тому числі крихтості, що є критерієм їх якісної оцінки при високій продуктивності і низькій енергоємності процесу.

Як зазначено в [8], брикетування складається з кількох послідовних етапів: стиснення тискування, витримки під тиском, зняття тиску, релаксації напруги, витримки без тиску, випресовування та пружного розширення брикету після виходу з камери. Ефективність процесу залежить від рівня оптимальності здійснення кожного етапу.

Оцінка стану суміші, що брикетується на кожному етапі окремо і з подальшим узагальненням результатів по всьому процесу брикетування дозволяє найбільш повно і всеосяжно встановити ці залежності у вигляді фізико-математичних моделей [1, 9].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Як зазначено в дослідженнях [2, 10] щільність пресування обумовлюється опором пресувальної камери, величина якого залежить від площі її поперечного перерізу, звуження до виходу, зовнішнього опору при виході з камери і від фізико-механічних властивостей матеріалу, тому тиск пресування складається з тиску, необхідного для ущільнення маси і тиску подолання сил тертя.

Згідно досліджень [2] схематично брикет об'ємом  $V$  можна представити у вигляді трьох складових: перша, заповнена сухою речовиною, має об'єм  $V_c$  і висоту  $h_c$ ; друга частина, заповнена рідкою фракцією, займає об'єм  $V_j$  і висоту  $h_j$ ; третина, заповнена газом, займає об'єм  $V_r$  та висоту  $h_r$ .

Відношення обсягу  $V$  до обсягу  $V_c$  називається коефіцієнтом ущільнення  $k_y$  [11]:

$$k_y = V/V_c. \quad (1)$$

Відношення суми обсягів рідкої та газоподібної фракцій до об'єму сухої речовини називається коефіцієнтом порізності, який пов'язаний з коефіцієнтом ущільнення наступним чином [11]:

$$k_n = 1 - 1/k_y. \quad (2)$$

Основна характеристика процесу брикетування – залежність між збільшенням тиску пресування і зростанням коефіцієнта ущільнення речовини. Ущільнення маси при пресуванні супроводжується дробленням, відносним зміщенням та адгезією частинок, що відбувається внаслідок їхньої пластичної деформації.

Чинники, що визначають процес пресування маси, можна поділити на дві групи.

До першої групи належать фактори, що характеризують наступні фізико-механічні - властивості маси [12, 13, 14]:

1. Модуль пресування – здатність маси до ущільнення під прикладеним до неї зовнішнім тиском за відсутності втрат тиску на тертя. Цей фактор у певному інтервалі тисків має постійну величину і залежить від роду маси, її структури та розмірів її чассток.

2. Коефіцієнт бічного тиску – відношення бічного тиску зі сторони пресованого матеріалу до діючого осьового тиску пресування.

3. Початкова щільність.

4. Вологість.

5. Температура.

6. Фракційний склад маси.

До другої групи належать фактори, що характеризують умови пресування [12, 13, 14]:

1. Питомий тиск пресування.

2. Коефіцієнт тертя маси об стінки пресувальної камери і всього каналу, яким проходить маса. Величина цього коефіцієнта



залежить від якості маси та форми (конусності) каналу.

3. Форма пресованого брикету та співвідношення його розмірів.

4. Режим пресування, який може бути циклічним чи безперервним.

5. Число поверхонь брикету, що безпосередньо зазнають тиску пресування. Залежно від їх числа процес може бути одностороннім, при якому зовнішній тиск ущільнювача безпосередньо прикладено до однієї поверхні пресованого брикету; двостороннім, при якому ущільнюючий тиск прикладено до двох протилежних поверхонь брикету, і багатостороннім – тиск, що пресує, прикладено до кількох поверхонь.

Солома при пресуванні не тільки пручається стисненню, але, як зазначено в [15], після зняття тиску енергійно прагне знову розширитися під дією сил релаксації. Тому лише комплексне дослідження впливу питомого тиску, фракційного складу, вологості, температурного режиму, тривалості витримки спресованої маси під тиском, складу та кількості з'язуючого на якісне виробництво брикету дозволить зробити вибір необхідних параметрів для розробки конструктивної схеми преса.

При утворенні брикету процес його стискання характеризується зміною щільності, тобто відбувається процес переходу суцільного середовища, що має властивості сипкого матеріалу і представляє складну трифазну систему, що складається з природних полімерів, сорбованої вологи і повітря і частинки різної форми і розміру в суцільне тверде середовище з властивостями моноліту, що має задану форму і розмір. У ньому зв'язок між частками характеризується силами Ван-дер-Ваальса та Лапласа.

Цей процес різні дослідники описують різними емпіричними формулами, ґрунтуються на врахуванні різних фізико-механічних та технологічних властивостей пресованих матеріалів та їх окремих компонентів.

Для встановлення аналітичного опису в роботі [16] використано статистичні методи, що застосовуються при дослідженні напруженого стану дисперсних середовищ, якою і є пресований матеріал.

При даній розробці теоретичних передумов пресування також використані статистичні методи, що застосовуються при дослідженні напруженого стану дисперсних середовищ при дещо відмінному підході.

#### **Мета та завдання дослідження.**

Метою досліджень є розробка фізико-математичної моделі процесу пресування паливних брикетів з рослинних матеріалів для подальшого визначення кінцевої щільності

матеріалу.

**Викладення основного матеріалу.** У початковий період пресування, до контакту поршня з масою, зважаючи на невпорядковане положення частинок, вона є суцільним однорідним ізотропним середовищем з внутрішнім тиском  $p_0$ . У міру стиснення порції матеріалу збільшується відносна деформація матеріалу, що виражається відношенням обсягу брикету до початкового стану маси, збільшуючи кількість точок взаємних контактів, частки будуть прагнути зайняти стійке положення, яке можна прийняти за найбільш ймовірне (як показує практика вони розташовуються перпендикулярно напрямку стиснення). Тобто брикет, що формується, набуває все більш анізотропних властивостей, де частинки взаємопов'язані між собою за рахунок застосування зовнішнього тиску  $p$ .

Збільшення числа точок взаємного контакту частинок призводить до збільшення зовнішнього тиску на величину  $dp$ , необхідну для подальшої деформації брикету на величину  $d\varepsilon$ . Зважаючи на незворотність і безперервність процесу стиснення його можна виразити залежністю [6, 15]:

$$dp = a(p + p_0)d\varepsilon, \quad (3)$$

де  $a$  – коефіцієнт пропорційності.

При збільшенні деформації на величину  $d\varepsilon$  відбувається зростання щільності маси  $p$ , що пресується в брикет

$$dp = \rho_0(1 - d\varepsilon), \quad (4)$$

де  $\rho_0$  – вихідна щільність маси.

Підставивши це значення у вираз (1) і проінтегрувавши його, отримаємо

$$p = C e^{a(p-p_0)/p} - p_0 \quad (5)$$

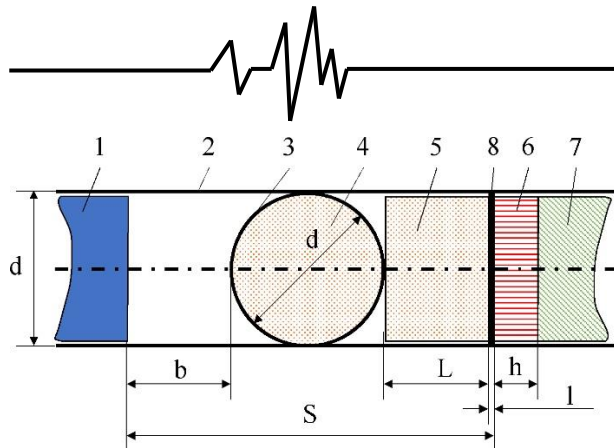
Постійна інтегрування  $C$  визначається з початкових умов. При  $p(\rho_0) = 0$  тоді

$$p = p_0 \left( e^{a(p-p_0)/p} - 1 \right) \quad (6)$$

Процес брикетування матеріалу у відкритій камері полягає у наступному. У міру переміщення поршня на величину  $x$  у напрямку осі  $X$  (рис. 1) матеріал стискається і щільність його збільшується так:

$$\rho = \rho_0 L / (L - x), \quad (7)$$

де  $L$  – довжина пресувальної камери, займана матеріалом при вихідній щільності.

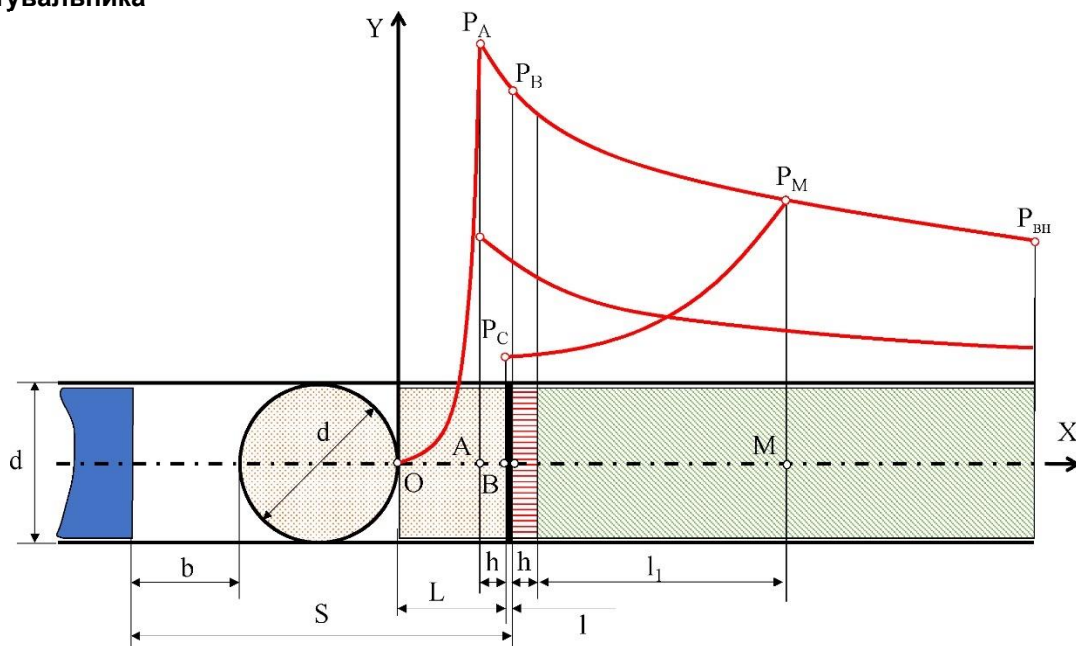


1 – пресуючий поршень; 2 – матриця; 3 – вхідний отвір; 4 – завантажений матеріал; 5 – завантажений матеріал після проходження поршнем через вхідний отвір; 6 – спресований брикет; 7 – брикети, що знаходяться в кулерині; 8 – сформований брикет

**Рис.1. Схема пресувальної камери брикетувальника**

Ущільнення поршнем матеріал початкової щільності  $\rho_0$ , поданого в пресувальну камеру, має починатися в точці O, яку приймаємо за початок осі X (рис. 2). При переміщенні поршня у бік цієї маси відбувається ущільнення. Щільність збільшується до того моменту, коли поршень переміститься в точку A пройшовши шлях робочого ходу, рівний  $L - h$  (де  $h$  – висота брикету). На цій ділянці щільність пресованої маси зростає залежно від  $\rho_x = \rho_0 L / (L - x)$  [16] від  $\rho_0$  у точці O до  $\rho_{\max}$  у точці A. Причому тиск на поршень, змінюючись за залежністю (4), у точці A досягає

$$p_A = \rho_0 \{ \exp[ah / (L - h) - 1] \}. \quad (8)$$



**Рис. 2. Процес брикетування у відкритій камері**

При подальшому переміщенні поршня спресована маса проштовхується далі каналом камери. У зв'язку із зменшенням величини опору проштовхуванню відбувається зниження тиску на поршень, який для круглого перерізу камери описується рівнянням

$$p_x = (p_A + q_0 / \mu_1) [\exp(-4f\mu_1 d)(h + x - L)] - q_0 / \mu_1, \quad (9)$$

де  $q_0$  – залишковий бічний тиск на стінки камери, що обумовлюється пружним розширенням спресованого матеріалу;  $\mu_1$  – коефіцієнт бічного тиску під час розвантаження;  $f$  – коефіцієнт тертя матеріалу стінки камери.

У точці B – кінцева точка переміщення поршня, тиск на нього дорівнює

$$p_B = (p_A + q_0 / \mu_1) [\exp(-4f\mu_1 d)(h + x - L)] - q_0 / \mu_1, \quad (10)$$

Після закінчення стиснення поршень відводиться назад і тиск з боку деформованого матеріалу знижується.

Деформація стеблових матеріалів не є повністю зворотною у зв'язку з чим характер зміни тиску розвантаження відрізнятиметься від стиснення. Незважаючи на те, що число контактів між частинками буде зменшуватися, воно не знизиться до вихідного значення, так як при стисненні частинки утворили між собою міцні з'єднання.

Оскільки зниження числа контактів між частинками призводить до зменшення прирощення тиску, необхідного для подальшого збільшення деформації, через незворотність і безперервність процесу розвантаження, характер зміни тиску описується виразом [16]



$$dP_1 = a_1(P_1 - P_0) d(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_i), \quad (11)$$

де  $P_1$  – тиск розвантаження;  $\varepsilon_{\max}$  – максимальна відносна деформація маси, що відповідає закінченню стиснення;  $\varepsilon_i$  – відносна поточна деформація маси при знятті тиску;  $a_1$  – коефіцієнт пропорційності.

Після поділу змінних та інтегрування отримаємо

$$P_1 = C_1 e^{a_1(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_i)} + P_0. \quad (12)$$

Для визначення постійної інтегрування  $C_1$  початковою умовою прийемо повне зняття навантаження  $P_1 = 0$ , у цьому випадку деформація брикету досягне залишкової  $\varepsilon_i = \varepsilon_{\max}$ .

Тоді формула (12) набуде вигляду

$$P_1 = P_{\max} (1 - e^{a_1(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_i)}) \quad (13)$$

При зворотному ході поршня при його переміщенні на величину  $l_p$  (величину пружної деформації спресованого матеріалу) тиск на поршень змінюється від  $p_B$  до  $p_C$ , яке дорівнює  $p_C = q/(\mu - \mu_1)$ , де  $\mu$  – коефіцієнт бічного тиску при навантаженні.

Ділянку спресованої маси  $CM$ , що знаходиться в камері і бере участь у пружному розширенні можна визначити з виразу

$$l = D \ln[(p_A + q_0 / \mu_1) / (p_C + q_0 / \mu_1)] [8 - (h + l_p)] / 2, \quad (14)$$

де  $l$  – величина пружного розширення спресованого матеріалу.

Тиск збільшується від  $p_C$  в точці  $C$  відповідно до залежності:

$$p_x = (p_A + q_0 / \mu_1) [\exp(4f\mu_1 d)(x - L + H)] - q_0 / \mu_1, \quad (15)$$

тобто для точки  $M$  при  $x = L + h + l$  воно дорівнює

$$p_M = (h_0 + q_0 / \mu_1) [\exp(4f\mu_1 l/d)] - q_0 / \mu_1. \quad (16)$$

До рівняння (14) входить величина  $l_p$ , знайти яку можна, використовуючи закономірності

$$l_p = h(p_{\max} / p_K - 1), \quad (17)$$

де  $p_K$  – щільність брикету після пружного розширення, що визначається виразом

$$p_K = a_0 p_0 + \beta_0 p_{\max} + a_t (p_{\max} - p_0) t, \quad (18)$$

де  $t$  – час витримки матеріалу під тиском;  $a_0$ ,  $\beta_0$ ,  $a_t$  – коефіцієнти, що характеризують пресований матеріал.

Так як при використанні для пресування

кривошипно-шатунних механізмів витримка при максимальному тиску практично відсутня і при стисканні  $\rho = \rho(t)$ , тому співмножник  $a_t p_{\max} t$  можна подати у вигляді

$$a_t p_{\max} t = a_\tau \int_0^{t_B - t_0} \rho(t) dt, \quad (19)$$

де  $a_\tau$  – коефіцієнт, що характеризує пресований матеріал та процес стиснення,  $t_0$ ,  $t_B$  – час приходу поршня в точки  $O$  та  $B$ .

Отже, вираз (18) набуде вигляду

$$p_K = a_0 p_0 + \beta_0 p_{\max} + a_\tau \int_0^{t_B - t_0} \rho(t) dt - a_t p_0 t. \quad (20)$$

Тому, як видно з (18), збільшення щільності брикету необхідно збільшувати час його витримки під тиском  $t_B - t_0$  і функціональну залежність  $\rho(t)$ . Один із шляхів – застосування механізму преса з низькою швидкістю дії на масу.

Значення величини "а" для матеріалів, що брикетуються і пресуються, залежно від факторів, які впливають на них, слід визначити в подальших експериментальних дослідженнях.

Таким чином, параметри та режими роботи штемпельного преса-брикетувальника з кривошипно-шатунним механізмом взаємопов'язані між собою і з фізико-механічними та технологічними властивостями матеріалу, що пресується.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** В результаті аналізу літературних джерел виявлено, що фізико-механічні властивості пресованих матеріалів, що визначаються фракційним складом, вологістю, температурою пресування, видом і часткою сполучного, впливають як на енергетичні показники процесу, так і на якісні показники брикетів.

Розроблена фізико-математична модель процесу пресування паливних брикетів з рослинних матеріалів, що дозволяє визначити кінцеву щільність матеріалу, що враховує особливості брикетування на штемпельному пресі з кривошипно-шатунним механізмом.

Встановлено, що параметри та режими роботи штемпельного преса-брикетувальника з кривошипно-шатунним механізмом взаємопов'язані між собою та фізико-механічними та технологічними властивостями пресованого матеріалу.

#### Список використаних джерел

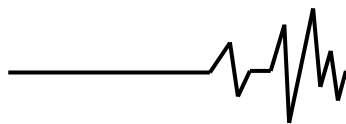
1. Chen S., Zhao Y., Tang Z., Ding H., Su Z., Ding Z. Structural Model of Straw Briquetting Machine with Vertical Ring Die and Optimization of Briquetting Performance. Agriculture. 2022. 736 p. DOI: 10.3390/agriculture12050736



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. 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. 48 p. <https://www.fao.org/3/ad579e/ad579e00.pdf>
5. Wang F.H., Tian Z.Y. The Virtual Design of Cluster Straw Fuel Briquetting Machine. In *Advanced Materials Research*. 299–300. 2011. 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. (2018). Установка для виготовлення паливних брикетів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. Вінниця. 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. 2020. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 776 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): 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): 4609. DOI: 10.3390/su12114609
11. Obi O.F., Pecenka R., Clifford M.J. A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters. *Energies*. (2022). Vol. 15(7): 2426. DOI: 10.3390/en15072426
12. Urbanovičová O., Krištof K., Findura P., Jobbágy J., Angelovič M. Physical and Mechanical Properties of Briquettes Produced from Energy Plants. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendel. Brun.*, (2017). Vol. 65(1): 219–224. DOI: 10.11118/actaun201765010219
13. Dragusanu V, Lunguleasa A, Spirchez C. Evaluation of the Physical, Mechanical, and Calorific Properties of Briquettes with or without a Hollow Made of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Straw Waste. *Applied Sciences*, (2022). Vol. 12(23): 11936. DOI: 10.3390/app122311936
14. Ajimotokan H. A., Ibitoye S. E., Odusote J. K., Adesoye O. A., Omoniyi P. O. Physico-mechanical Properties of Composite Briquettes from Corn cob and Rice Husk. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, (2019). Vol. 4 (3): 159–165. DOI: 10.12162/jbb.v4i3.004
15. Wang J, Wang B, Liu J, Ni L, Li J. Effect of Hot-Pressing Temperature on Characteristics of Straw-Based Binderless Fiberboards with Pulping Effluent. *Materials*, (2019). Vol. 12(6): 922. DOI: 10.3390/ma12060922
16. Іванчук Я. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Добровольська К. В., Замковий О. Д., Павлович Р. І. Математичне моделювання напруженого стану ґрунтового середовища. *Вісник ВПІ*. (2022). Вип. 1 С.103–111. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-103-111>

## References

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. 736 p. DOI: 10.3390/agriculture12050736 [in English]
2. Aliiev E.B., Patsula O.M., Hrytsenko V.T. *Tekhnolohiia kompleksnoi bezvidkhidnoi pererobky makukhy z nasinnia oliinykh kultur z otrymanniam vysokoiakisnykh povnotsinnykh proteiNovykh dobavok u vyhliadi pellet ta tverdoho biopalyva*. Naukovo-metodychni rekomendatsii. Instytut oliinykh kultur Natsionalnoi akademii ahrarykh nauk Ukrainy. Elektronnyi analoh drukovanoho vydannia (elektronna knyha). Zaporizhzhia. 2017. ISBN 978-617-7353-59-0 [in Ukrainian]
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. 2 (1) P. 28–34. DOI:



10.5923/j.ijee.20120201.05 [in English]

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. 48 p. <https://www.fao.org/3/ad579e/ad579e00.pdf> [in English]

5. Wang F.H., Tian Z.Y. The Virtual Design of Cluster Straw Fuel Briquetting Machine. In *Advanced Materials Research*. 299–300. 2011. P. 925–928. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.299-300.925 [in English]

6. Aliiev E.B., Patsula O.M., Havrylchenko O.S. Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen ustanovky dlia vyhotovlennia palivnykh bryketiv z lushpynnoi fraktsii makukh nasinnia oliinykh kultur. *Tekhnichni systemy i tekhnolohii tvarynystva: Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*. 2016. № 170. С. 3–7. [in Ukrainian]

7. Aliiev E.B., Yaropud V.M., Havrylchenko O.S., Ivanchenko O.V., Patsula O.M. (2018). Ustanovka dlia vyhotovlennia palivnykh bryketiv. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK. Vinnytsia*. 2018. № 4 (103). С. 69-74. [in Ukrainian]

8. Berdychowski M., Wilczyński D., Wałęsa K., Górecki J. Research on the compaction process of loose materials with use of helix technology. 2020. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 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. Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. *Energies*. 2021. Vol. 14 (24): 8320. DOI: 10.3390/en14248320 [in English]

10. Kpaló 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): 4609. DOI: 10.3390/su12114609 [in English]

11. Obi O.F., Pecenka R., Clifford M.J. A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters. *Energies*. (2022). Vol. 15(7): 2426. DOI: 10.3390/en15072426

12. Urbanovičová O., Krištof K., Findura P., Jobbágy J., Angelovič M. Physical and Mechanical Properties of Briquettes Produced from Energy Plants. *Acta Univ. Agric. Silv. Mendel. Brun.*, (2017). Vol. 65(1): 219–224. DOI: 10.11118/actaun201765010219

13. Dragusanu V, Lunguleasa A, Spirchez C. Evaluation of the Physical, Mechanical, and Calorific Properties of Briquettes with or without a Hollow Made of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Straw Waste. *Applied Sciences*,

(2022). Vol. 12(23): 11936. DOI: 10.3390/app122311936

14. Ajimotokan H. A., Ibitoye S. E., Odusote J. K., Adesoye O. A., Omoniyi P. O. Physico-mechanical Properties of Composite Briquettes from Corn cob and Rice Husk. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, (2019). Vol. 4 (3): 159–165. DOI: 10.12162/jbb.v4i3.004

15. Wang J, Wang B, Liu J, Ni L, Li J. Effect of Hot-Pressing Temperature on Characteristics of Straw-Based Binderless Fiberboards with Pulping Effluent. *Materials*, (2019). Vol. 12(6): 922. DOI: 10.3390/ma12060922

16. Ivanchuk Ya. V., Iskovych-Lototskyi R. D., Dobrovolska K. V., Zamkovyi O. D., Pavlovich R. I. Mathematical modeling of the stressed state of the soil environment. *Visnyk VPI*. (2022). Issue 1, pp. 103–111. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-103-111>. [in Ukrainian].

#### PHYSICO-MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF PRESSING FUEL BRIQUETTES FROM PLANT MATERIALS

*In the process of forming a briquette, compression is characterized by a change in density, i.e., the process of translating a solid medium that has the properties of a bulk material and has a complex three-phase system consisting of natural polymers, sorbed moisture, air and particles of different shapes and sizes into a continuous solid medium with the properties of a monolith given shape and size. In it, the connection between particles is characterized by Van der Waals and Laplace forces. Different researchers describe this process with different empirical formulas, which are based on taking into account the relevant physico-mechanical and technological properties of pressed materials and their individual components.*

*The plant materials considered in the article, which are secondary products of the agro-industrial complex, have specific physical and mechanical properties. As a result, the development of a physico-mathematical model of the process of pressing fuel briquettes from vegetable materials of small-seeded and cereal crops is proposed for the purpose of research.*

*As a result of the analysis of literary sources, it was found that the physical and mechanical properties of pressed materials are determined by the fractional composition, humidity, pressing temperature, type and content of the binder. These indicators affect both the energy indicators of the process and the quality indicators of the briquettes.*

*The multi-component nature, origin and structure of materials of different nature entails the*



expansion of the variety of physical and mechanical properties that must be taken into account. The influence of elastic, viscous and frictional properties of the materials selected for pressing is considered and taken into account.

A physico-mathematical model of the process of pressing fuel briquettes from plant materials was developed, which allows determining the final density of the material, taking into account the peculiarities of briquetting using a stamp press with a crank mechanism.

It was established that the parameters and modes of operation of the stamp press briquetting machine with a crank-and-rod mechanism are interconnected with each other and the physical, mechanical and technological properties of the pressed material

**Key words:** fuel briquettes, plant materials, pressing, pressure, load, density, physical-mathematical model, properties, parameters.

#### 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). ORCID 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](mailto:luts@vsau.vin.ua)). ORCID 0000-0002-3776-8940.

**Кисельов Олексій Васильович** - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інституту механізації тваринництва Національної академії аграрних наук України (м. Запоріжжя, Україна, e-mail: [awbakis@gmail.com](mailto:awbakis@gmail.com)).

**Govorukha Volodymyr** - 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). ORCID 0000-0002-0936-9272.

**Luts Pavlo** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of machines and equipment of agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 1, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [luts@vsau.vin.ua](mailto:luts@vsau.vin.ua)). ORCID 0000-0002-3776-8940.

**Kiselyov Olexsiy** - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Institute of Mechanization of Animal Husbandry of National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (Zaporizhia, Ukraine, e-mail: [awbakis@gmail.com](mailto:awbakis@gmail.com)).