

**Алієв Е. Б.**д.т.н., старший дослідник,
професор**Дудін В. Ю.**

к.т.н., доцент

Лінко М. О.

аспірант

**Дніпровський
державний аграрно-
економічний
університет****Aliiev E.**Doctor of Technical Sciences,
Senior Researcher, Professor**Dudin V.**

Ph.D., Associate Professor

Linko M.

postgraduate student

**Dnipro State Agrarian and
Economic University****УДК 631.363:636.087****DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-3****РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ
ФОРМУВАННЯ ЕКСПАНДАТІВ**

Експандоване приготування кормів здійснюється за допомогою високотемпературних (80–140 °С) експандерів. Ці експандери виконують завдання приготування харчових продуктів і кормів під високим тиском (1–10 МПа). Процес експандування супроводжується хімічними змінами, такими як денатурація білків, амінокислот, вітамінів, крохмалю і ферментів. Окрім цього, відбувається зміна фізико-механічних властивостей компонентів корму, перетворюючи їх у форму експандатів.

Метою лабораторних досліджень процесу формування експандатів є встановлення закономірностей зміни тиску стискування від деформації компонентів комбікорму та щільності отриманих експандатів при різних технологічних параметрів. Дослідження з визначення впливу гранулометричного складу комбікорму, його вологості та температурного режиму на діаграму деформування – залежність між напруженням і деформацією матеріалу, проводили з використанням випробувальної машини Heckert FP-100/1 та додаткових пристроїв і обладнання.

В якості факторів досліджень обрано вологість комбікорму W (10 %, 20 %, 30 %), його температуру T (80 °С, 110 °С, 140 °С), середній діаметр частинок подрібнених компонентів кормів D_m (0,5 мм, 1,5 мм, 2,5 мм). Дослідження проводились за повнофакторним дослідом із загальною кількістю дослідів – 27. Повторність – триразова. За кожним дослідом отримана закономірність зміни тиску стискування від деформації (закономірність пружного гістерезису) компонентів комбікорму $\Delta P(\epsilon z)$.

В якості критеріїв досліджень обрані: площа $S_{\Delta P}$, укладена всередині петлі пружного гістерезису $\Delta P(\epsilon z)$; коефіцієнт механічних втрат (або відносний гістерезис) Ψ , що розраховується, як відношення площі петлі гістерезис $S_{\Delta P}$ до площі, укладеної між кривою напруги і віссю абсцис, де відкладені деформації SP_1 ; висота отриманого зразка експандату h_a ; щільність отриманих експандатів ρ_a .

В результаті лабораторних досліджень процесу формування експандатів встановлені залежності зміни тиску стискування від деформації компонентів комбікорму $\Delta P(\epsilon z)$. Визначені закономірності зміни площі петлі пружного гістерезису $S_{\Delta P}$, коефіцієнта механічних втрат Ψ , висоти отриманого зразка експандату h_a , щільності отриманих експандатів ρ_a від вологості комбікорму W , його температури T та середнього діаметра частинок подрібнених компонентів D_m .

Вирішуючи компромісну задачу, яка полягає у мінімізації коефіцієнта механічних втрат Ψ і максимізації щільності отриманих експандатів ρ_a , отримуємо наступні раціональні технологічні параметри при яких процес експандування кормів є найбільш ефективним: $D_m = 0,5$ мм, $T = 119,2$ °С, $W = 19,1$ %, $\rho_a = 292,9$ кг/м³.

Ключові слова: експандати, стискування, комбікорм, технологічні параметри, температура, тиск, вологість, щільність, гістерезис, коефіцієнт механічних втрат.



Вступ Експандоване приготування кормів здійснюється за допомогою високотемпературних (80–140 °С) експандерів [1, 2]. Ці експандери виконують завдання приготування харчових продуктів і кормів під високим тиском (1–10 МПа) [1, 3]. Процес експандування супроводжується хімічними змінами, такими як денатурація білків, амінокислот, вітамінів, крохмалю і ферментів. Окрім цього, відбувається зміна фізико-механічних властивостей компонентів корму, перетворюючи їх у форму експандатів [1, 4].

Під час експандованого приготування кормів, фізико-технологічні аспекти, такі як теплопередача, масообмін, передача імпульсу, тиск та час дії температури, відіграють важливу роль і мають суттєвий вплив на властивості харчових продуктів і кормів [5, 6]. Ці фактори можуть значно вплинути на якість кінцевого продукту, тому їх правильна регуляція і контроль є важливими аспектами процесу експандованого приготування кормів.

Застосування експандерів є важливим у виробництві кормів та харчових продуктів, оскільки ці технічні засоби дозволяють покращити якість та поживні характеристики кінцевого продукту. Завдяки високій продуктивності і регульованому тиску, експандери забезпечують ефективну обробку матеріалів, зберігаючи при цьому їхні корисні властивості.

Тому раціоналізація технологічних параметрів процесу формування експандатів є актуальною проблемою інжинірингу експандерів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експандери складаються з кількох основних компонентів, серед яких варто виділити блоки подачі і попередньої обробки, корпус з клапанами для впорскування пари, гідравлічну систему з матрицею для регулювання тиску та гвинт, що приводиться в рух від двигуна. Сам експандер представляє собою спеціально розроблений одногвинтовий технічний засіб з діаметром від 70 до 500 мм та здатністю працювати з високою продуктивністю (до 30 т/год) [7, 8].

Залежно від вимог та типу матеріалів, що обробляються, експандери можуть бути оснащені різноманітними головками, такими як конічні кільцеподібні з кільцевими зазорами, пальцеподібні, фланцеві або дископодібні. Крім того, вони можуть мати просту систему пластифікації для забезпечення оптимального оброблення матеріалів [1, 8].

Далі розглянемо процес експандування кормів. Спочатку матеріал піддається подрібненню, попередній обробці та зволоженню. Потім він переміщується вздовж корпусу експандера, де потрапляє під високий

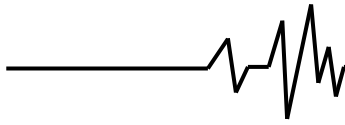
тиск всередину опорного блоку. В результаті тертя та додавання гарячої пари температура збільшується. Коли продукт виходить з матриці установки, відбувається швидке випаровування води через різке падіння тиску, що призводить до розширення матеріалу. Час перебування всередині експандера становить приблизно 5–10 секунд за температури 100–125 °С. При виході з матриці, температура швидко зменшується до приблизно 90 °С. Після завершення експандування матеріалу, суміш перенаправляють в горизонтальну сушарку-охолоджувач на 10 хвилин, протягом яких температуру знижують до 20–24 °С, що відповідає температурі навколишнього середовища. Такий процес дозволяє забезпечити оптимальну якість та стабільність кінцевого продукту після експандування [1, 9].

Як зазначено в багатьох літературних джерелах [2, 4, 10] на процес експандування найбільший вплив чинять наступні технологічні параметри: розмір частинок компонентів, їх вологість, температура і тиск. Тому для обґрунтування їх раціональних значень необхідно провести попередні лабораторні дослідження щодо стискання комбікорму і формування експандатів.

Мета та завдання дослідження. За результатами лабораторних досліджень процесу формування експандатів необхідно встановити закономірності зміни тиску стискання від деформації компонентів комбікорму та щільності отриманих експандатів при різних технологічних параметрів.

Виклад основного матеріалу. Приведені дослідження передбачали пресування компонентів комбікорму з подальшим формуванням з них експандатів в лабораторних умовах при різних технологічних параметрах (розмір частинок компонентів, їх вологість і температура).

На початку досліджень готували зразки комбікорму різного гранулометричного складу. В якості складових комбікорму, у співвідношенні 25×25×25×25 %, використовували зерно пшениці, ячменю, кукурудзи та соняшникову макуху, подрібнені за допомогою молоткового подрібнювача з діаметром отворів решіт 3,5 мм. Далі, за допомогою ситового класифікатора та розсійника лабораторного було проведено розділення отриманих після подрібнення матеріалів на фракції, з діапазоном розміру часток 0–0,99 мм, 1–1,99 мм та 2–2,99 мм. Приготування комбікорму проводили за допомогою лабораторного спірального-гвинтового змішувача сипких матеріалів, який дозволяє отримувати суміші однорідністю 94–98 %. Отримані зразки вихідної вологості мали наступний вигляд (рис. 1).



а

б

в

Рис. 1. Зразки комбікорму вихідної вологості різного гранулометричного стану:
а – розмір часток 0–0,99 мм; б – 1–1,99 мм; в – 2–2,99 мм

Вихідну вологість отриманих зразків визначали термогравіметричним методом згідно ДСТУ ISO 712:2015 «Зернові та продукти з них. Визначення вмісту вологи. Контрольний метод (ISO 712:2009, IDT)» [11] з використанням шафи СЕШ-3М. Вихідну вологість (10 ± 2 %) зразків комбікорму змінювали шляхом додавання відповідної кількості води:

$$m_{\text{в}} = m_{\text{з}} \left(\frac{100 - W_0}{100 - W_{\text{н}}} - 1 \right), \quad (1)$$

де $m_{\text{в}}$, $m_{\text{з}}$ – маса води та зразка комбікорму відповідно, кг; W_0 , $W_{\text{н}}$ – вихідна вологість та вологість, яку необхідно отримати, %.

Дослідження з визначення впливу гранулометричного складу комбікорму, його вологості та температурного режиму на діаграму деформування – залежність між напруженням і деформацією матеріалу, проводили з використанням випробувальної машини Heckert FP-100/1 та додаткових пристроїв і обладнання (рис. 2).

Принцип дії FP-100/1 полягає у вимірі сили при деформації встановленого на нерухомому траверсу зразка, що виникає при переміщенні рухомої траверси із постійною заданою швидкістю. Залежність деформації від навантаження фіксували за допомогою аналогово-цифрового перетворювача NI USB-6008, аналоговий вхід якого було під'єднано вимірювального блоку FP-100/1. Запис результатів проводили на ПЕОМ з використанням програмного забезпечення NI SignalExpress 2015.

Дослідження проводили з використанням прес-форми, оснащеної обігрівом який являє собою обмотку з ніхромової проволочки діаметром 1,0 мм по зовнішній поверхні матриці, ізольовану з обох боків шарами азбесту (рис. 3). Нагрів прес-

форми до потрібної температури та її підтримання здійснювали шляхом подачі на ніхромову обмотку регульованого за допомогою лабораторного автотрансформатора ЛАТР-1М змінного струму. Розміри формуючих поверхонь прес-форми – внутрішній діаметр матриці 50 мм, діаметр знака – 30 мм.

Послідовність проведення досліджень наступна.

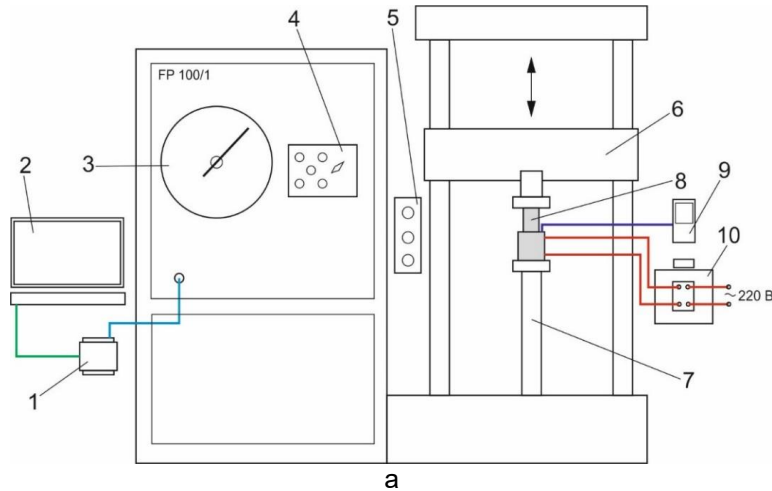
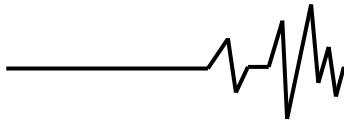
1. Нагрівання прес-форми до температури у відповідності до номеру дослідження, контроль температури за допомогою цифрового термометру з термопарою FLUS ET-960.

2. Підготовка наважки зразка комбікорму у відповідності до номеру дослідження. Для цього використовували мірну ємність, об'ємом 50,24 мл, що дозволяло заповнювати робочу камеру прес-форми на висоту 40 мм, зважування зразка проводили за допомогою вагів лабораторних JD-2200-2 (рис. 7).

3. Завантаження наважки зразка до прес-форми. Для цього з прес форми видаляли верхній пуансон, засипали зразок до робочої камери, розрівнювали та встановлювали верхній пуансон.

4. Проведення стиску. Для цього встановлювали прес-форму на платформу нижньої траверси, вмикали рух верхньої траверси FP-100/1. По досягненню зусилля 13 кН рух верхньої траверси припиняли та після витримки 20 с знімали навантаження та підіймали верхню траверсу. Зазначене зусилля визначено з аналізу літературного огляду відомих екструдерів і експандерів кормів [1, 6].

Видалення зразка та фіксування його параметрів. Зразок видаляли з прес-форми, після чого проводили його зважування за допомогою вагів лабораторних JD-2200-2 та вимірювання висоти, за допомогою штангенциркуля ШЦ-1-150.



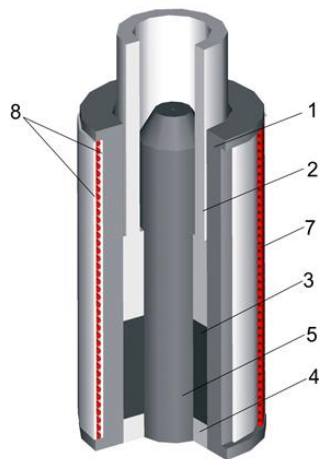
а



б



Рис. 2. Схема (а) та загальний вигляд (б) випробувальної машини Heckert FP-100/1 з додатковим обладнанням: 1 – аналогово-цифровий перетворювач NI USB-6008; 2 – ПЕОМ; 3 – силовімірник; 4 – панель налаштувань FP-100/1; 5 – панель керування FP-100/1; 6 – рухома траверса; 7 – нерухома траверса; 8 – прес-форма з досліджуваним зразком; 9 – цифровий термометр з термопарою FLUS ET-960; 10 – лабораторний автотрансформатор ЛАТР-1М



а



б

Рис. 3. Прес-форма прямого пресування: схема (а) та загальний вигляд (б): 1 – матриця; 2 – пуансон верхній; 3 – зразок; 4 – пуансон нижній; 5 – знак; 6 – отвір для термопарі; 7 – ніхромова обмотка (обігрів); 8 – шари азбесту



В якості факторів досліджень обрано вологість комбікорму W (10 %, 20 %, 30 %), його температуру T (80 °C, 110 °C, 140 °C), середній діаметр частинок подрібнених компонентів кормів D_{μ} (0,5 мм, 1,5 мм, 2,5 мм). Дослідження проводились за повнофакторним дослідом із загальною кількістю дослідів – 33 = 27. Повторність – триразова. За кожним дослідом отримана закономірність зміни тиску стискання від деформації (закономірність пружного гістерезису) компонентів комбікорму $\Delta P(\epsilon_z)$. В якості критеріїв досліджень обрані:

– площа $S_{\Delta P}$, укладена всередині петлі пружного гістерезису $\Delta P(\epsilon_z)$ [12];
– коефіцієнт механічних втрат (або відносний гістерезис) Ψ , що розраховується, як відношення площі петлі гістерезис $S_{\Delta P}$ до площі, укладеної між кривою напруги і віссю абсцис, де відкладені деформації SP_1 [13];
– висота отриманого зразка експандату h_a ;
– щільність отриманих експандатів ρ_a .
Загальний вигляд отриманих окремих зразків експандатів для кожного дослідів (одна з повторностей) наведено на рис. 4.



Рис. 4. Загальний вигляд отриманих окремих зразків експандатів для кожного дослідів (одна з повторностей)

Візуалізація закономірностей зміни тиску стискання від деформації компонентів комбікорму $\Delta P(\epsilon_z)$ для окремих дослідів наведена на рис. 5.

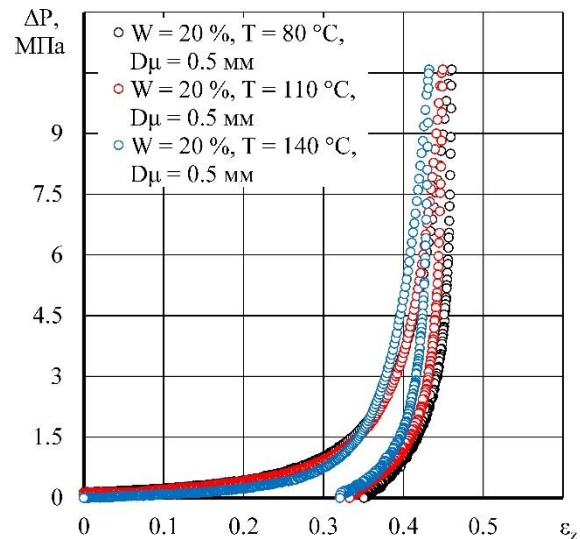
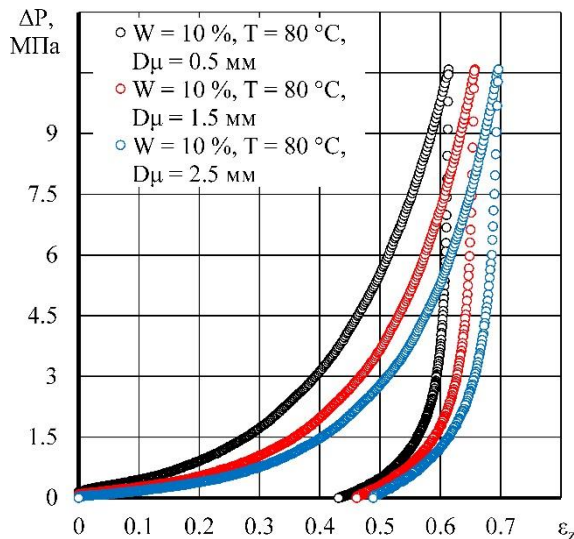
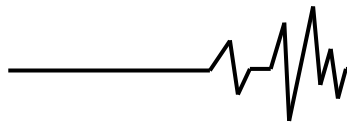


Рис. 5. Закономірності зміни тиску стискування від деформації компонентів комбікорму $\Delta P(\varepsilon_z)$ для окремих дослідів

В результаті розрахунку критеріїв досліджень і обробки отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Cloud отримані рівняння регресії другого порядку в закованому вигляді після скорочення незначущих коефіцієнтів за критерієм Стьюдента:

– площа петлі пружного гістерезису:

$$SDP = 3,38929 - 0,214174 D_{\mu} + 0,0425747 D_{\mu}^2 - 0,00879098 T - 0,111558 W + 0,000201695 T W + 0,00098219 W^2; \quad (2)$$

– коефіцієнт механічних втрат Ψ (рис. 6):

$$\Psi = 0,523551 + 0,0752476 D_{\mu} + 0,00132849 T + 0,0583049 W + 0,000477652 D_{\mu} W + 0,0000519639 T W - 0,00136235 W^2; \quad (3)$$

– висота отриманого зразка експандату h_a :

$$h_a = 27,9931 + 2,04722 D_{\mu} - 0,166667 D_{\mu}^2 - 0,0800463 T - 0,00527778 D_{\mu} T + 0,000314815 T^2 - 0,919444 W + 0,0201667 W^2 \quad (4)$$

– щільність отриманих експандатів ρ_a (рис. 7):

$$\rho_a = 82,2327 - 0,796456 D_{\mu} + 2,53957 T - 0,0106447 T^2 + 6,51092 W - 0,534306 D_{\mu} W - 0,163438 W^2 \quad (5)$$

Статистична перевірка отриманих рівнянь регресії за критерієм Фішера свідчить про їх адекватність: $F(2) = 1,285 < F(0,05;20;54) = 1,768$; $F(3) = 1,392 < F(0,05;19;54) = 1,783$; $F(4) = 1,561 < F(0,05;20;54) = 1,768$; $F(5) = 1,343 < F(0,05;20;54) = 1,768$.

З рис. 6 видно, що із збільшенням розмірів частинок суміші D_{μ} коефіцієнт механічних втрат Ψ збільшується. Так як коефіцієнт механічних втрат Ψ характеризує ступінь витраченої енергії, то дану закономірність можна пояснити наступним чином. Великі частинки акумулюють енергію пружного тіла, що підсилюється наявністю високою температури. Таке підвищення призводить до збільшення внутрішньої енергії суміші, що намагається максимально протидіяти процесу стискування. В свою чергу для вологості W спостерігається оптимум. Це пояснюється тим, що при високій вологості ($> 24,5\%$) зайва волога виходить з суміші і випаровується під дією високої температури T . До речі, про це свідчить додаток попарної взаємодії факторів $T \cdot W$ в рівнянні регресії (3). Також в рівнянні (3) є додаток попарної взаємодії факторів $D_{\mu} \cdot W$, що свідчить про взаємозв'язок вологості із розміром частинок суміші.

З рис. 7 видно, що із збільшенням розмірів частинок суміші D_{μ} щільність отриманих експандатів ρ_a зменшується. Це є логічним спостереженням, так як частинки меншого розміру мають більш високу щільність упаковки в ємності. Для вологості ($W = 19,1\%$) і температури ($T = 119,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) спостерігається оптимум для щільності отриманих експандатів ρ_a . Це свідчить, як зазначено вище про наявність зайвої вологи, що випаровується при високих температурах. А при високих температурах частинки комбікорму зміцнюються і не дають змоги утворювати конгломерати високої щільності.

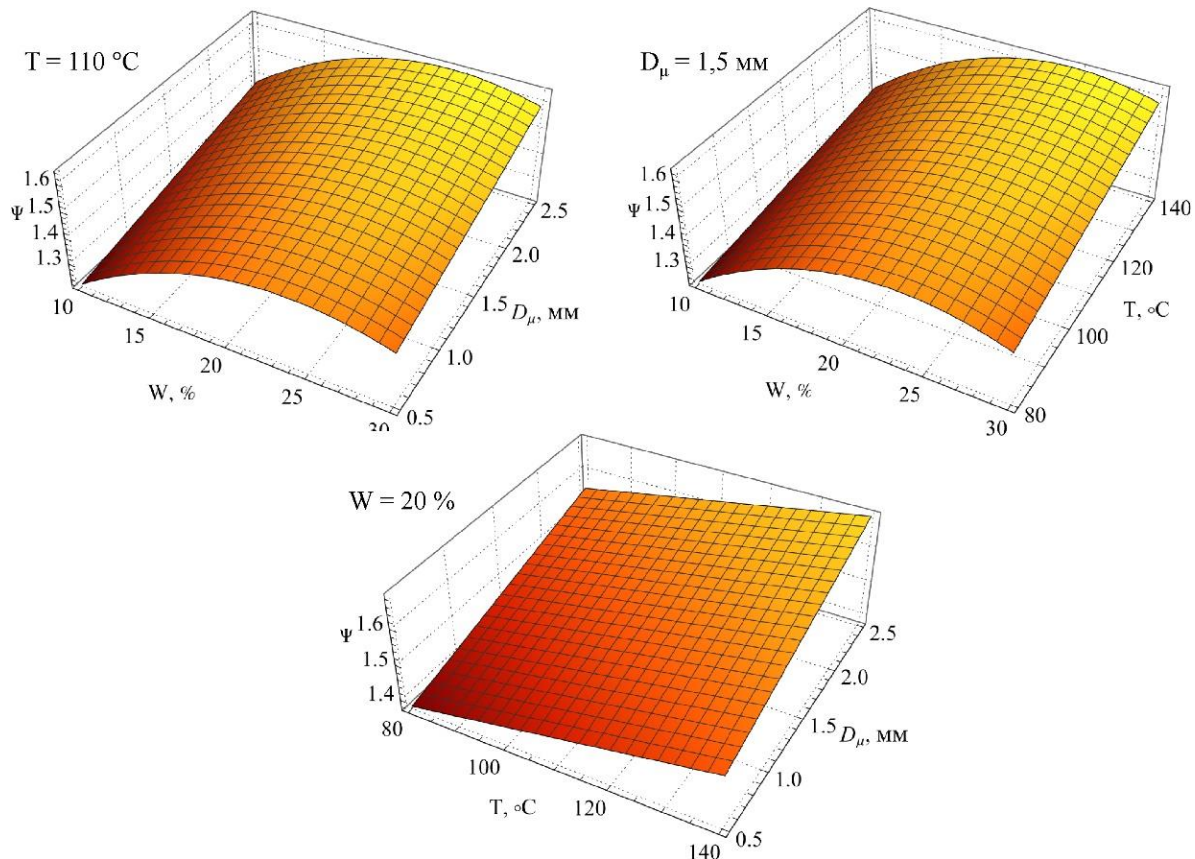
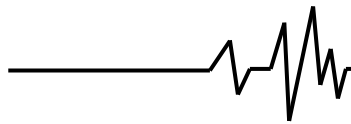


Рис. 6 Залежність коефіцієнта механічних втрат Ψ від факторів досліджень

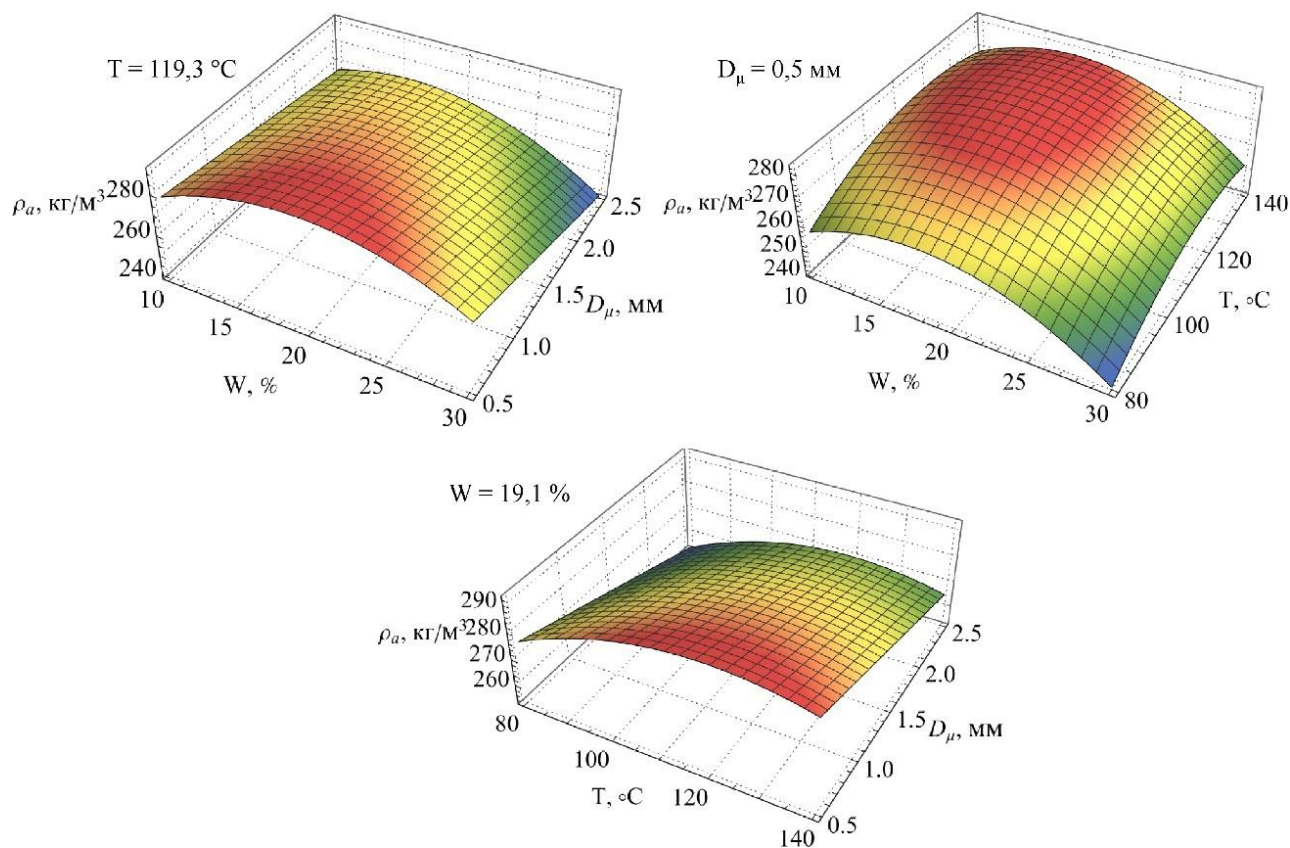
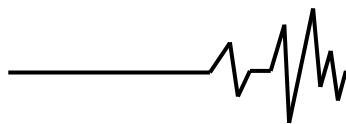


Рис. 7 Залежність щільності отриманих експандатів ρ_a від факторів досліджень



Так, як коефіцієнт механічних втрат Ψ характеризує енерговитрати процесу (без процесу нагрівання), а щільність отриманих експандатів ρ_a є якісним критерієм, то зведемо лабораторні дослідження до наступної компромісної задачі:

$$\begin{cases} \Psi(W, T, D_\mu) \rightarrow \min; \\ \rho_a(W, T, D_\mu) \rightarrow \max; \\ 10 \leq W \leq 30; \\ 80 \leq T \leq 140; \\ 0,5 \leq D_\mu \leq 1,5. \end{cases} \quad (6)$$

Вирішуючи компромісну задачу (6) спільно з (3) і (5) в програмному пакеті Wolfram Cloud отримуємо наступні раціональні технологічні параметри при яких процес експандування кормів є найбільш ефективним: $D_\mu = 0,5$ мм, $T = 119,2$ °С, $W = 19,1$ %, $\rho_a = 292,9$ кг/м³.

Висновки. В результаті лабораторних досліджень процесу формування експандатів встановлені залежності зміни тиску стискання від деформації компонентів комбікорму $\Delta P(\epsilon z)$. Визначені закономірності зміни площі петлі пружного гістерезису $S_{\Delta P}$, коефіцієнта механічних втрат Ψ , висоти отриманого зразка експандату h_a , щільності отриманих експандатів ρ_a від вологості комбікорму W , його температури T та середнього діаметра частинок подрібнених компонентів D_μ . Вирішуючи компромісну задачу, яка полягає у мінімізації коефіцієнта механічних втрат Ψ і максимізації щільності отриманих експандатів ρ_a , отримуємо наступні раціональні технологічні параметри при яких процес експандування кормів є найбільш ефективним: $D_\mu = 0,5$ мм, $T = 119,2$ °С, $W = 19,1$ %, $\rho_a = 292,9$ кг/м³.

Список використаних джерел

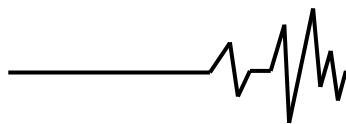
1. Алієв, Е. Б., Лінко, М. О. Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів експандованого приготування кормів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. 1 (116). С. 51–57. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-1-6
2. Prestlokken, E., Forutvikling F. Expander treatment. HFE 305 *Feed Manufacturing Technology*. 2015. P. 1–13. Retrieved from: http://www.umb.no/statisk/iha/kurs/nova/feed_technology/4.pdf
3. KAHL (2012). Expanded structured feed for pigs. Description of the production process and the product properties. Retrieved from: <https://www.akahl.com/fileadmin/media/akahl/bilde>

r/anlagen
/Futtermittelanlagen/Mischfutteranlage/PDF/Expanded_structurized_feed.pdf

4. Yegorov B., Batievskaya N. Quality assessment of compound feeds in the form of mixture crumbs. *Grain Products and Mixed Fodder's*. 2020. № 20(1). Pp. 41–47. DOI: 10.15673/gpmf.v20i1.1693
5. Fancher B. I., Rollins D., Trimbee B. Feed Processing Using the Annular Gap Expander and Its Impact on Poultry Performance1. *Journal of Applied Poultry Research*. 1996. № 5(4). P. 386–394. DOI: 10.1093/japr/5.4.386
6. Guy R. Extrusion Cooking. Technologies and Applications. CRC Press Inc. Boca Ration. FL. 2001. 206 p. Retrieved from: https://mastermilk.com/uploads/biblio/extrusion_cooking_techniques_applications.pdf
7. Moscicki L., Mitrus M., Wojtowicz A.. Technika ekstruzjiw przetworstwie rolno-spozywczym. PWRiL. Warszawa. 2007. 222 p.
8. Hancock J. D. Extrusion technologies to produce quality pig feed. *Feed Technol*. 2001. № 5 (3). P. 18–20.
9. Amandus Kahl GmbH. (2022). Technical materials, laboratory reports (personal communication). Retrieved from: www.akahl.com
10. Aliiev, E., Dudin, V., Linko, M. Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander. *Machinery & Energetics*. 2022. № 13(3). P. 9-16. DOI: 10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16
11. ДСТУ ISO 712:2015 Зернові та продукти з них. Визначення вмісту вологи. Контрольний метод (ISO 712:2009, IDT). ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). 21 с. http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=83685
12. Булгаков В. М., Адамчук В. В., Черниш О. М., Березовий М. Г., Калетнік Г. М., Яременко В. В. Прикладна механіка. К.: Центр учбової літератури, 2020. 906 с.
13. Solona O., Derevenko I., Kupchuk I. Determination of plasticity for pre-deformed billet. *Solid State Phenomena*. 2019. № 291. P. 110-120.

References

1. Aliiev, E. B., Linko, M. O. (2022). Analiz tekhniko-tekhnologichnoho osnashchennya protsesiv ekspandovanoho pryhotuvannya kormiv [Analysis of technical and technological equipment of expanded feed preparation processes]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK – Technology, energy, transport of agricultural industry*. VNAU, 1 (116), 51–57. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-1-6.
2. Prestlokken, E., Forutvikling F.



(2015). Expander treatment. *HFE 305 Feed Manufacturing Technology*. 1–13. Retrieved from: http://www.umb.no/statisk/iha/kurs/nova/feed_technology/4.pdf

3. KAHL (2012). Expanded structured feed for pigs. *Description of the production process and the product properties*. Retrieved from:

https://www.akahl.com/fileadmin/media/akahl/bilder/anlagen/Futtermittelanlagen/Mischfutteranlage/PDF/Expanded_structurized_feed.pdf

4. Yegorov, B., Batievskaya, N. (2020). Quality assessment of compound feeds in the form of mixture crumbs. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 20 (1), 41–47. DOI: 10.15673/gpmf.v20i1.1693

5. Fancher, B. I., Rollins, D., Trimbee, B. (1996). Feed Processing Using the Annular Gap Expander and Its Impact on Poultry Performance1. *Journal of Applied Poultry Research*, 5 (4), 386–394. DOI: 10.1093/japr/5.4.386

6. Guy, R. (2001). *Extrusion Cooking. Technologies and Applications*. CRC Press Inc. Boca Ration. FL. 206 p. Retrieved from: https://mastermilk.com/uploads/biblio/extrusion_cooking_techniques_applications.pdf

7. Moscicki, L., Mitrus, M., Wojtowicz, A. (2007). *Technika ekstruzjiw przetworstwie rolnospo zywczym*. PWRiL. Warszawa. 222 p.

8. Hancock, J. D. (2001). Extrusion technologies to produce quality pig feed. *Feed Technol.* 5 (3), 18–20.

9. Amandus Kahl GmbH. (2022). *Technical materials, laboratory reports (personal communication)*. Retrieved from: www.akahl.com

10. Aliiev, E., Dudin, V., Linko, M. (2022). Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander. *Machinery & Energetics*. 13(3), 9-16. DOI: 10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16

11. DSTU ISO 712:2015 Zernovi ta produkty z nykh. Vyznachennya vmistu volohy. Kontrol'nyy metod (ISO 712:2009, IDT) [DSTU ISO 712:2015 Zernovi ta produkty z nykh. Vyznachennya vmistu volohy. Kontrol'nyy metod (ISO 712:2009, IDT). DP «Ukrayins'kyy naukovodoslidnyy i navchal'nyy tsentr problem standartyzatsiyi, sertyfikatsiyi ta yakosti» (DP «UkrNDNTS»)]. 21 c.

http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=83685. DP «Ukrayins'kyy naukovodoslidnyy i navchal'nyy tsentr problem standartyzatsiyi, sertyfikatsiyi ta yakosti» (DP «UkrNDNTS») – Research and Training Center for Problems of Standardization, Certification and Quality" (SE "UkrNDNC"). 21 c. Retrieved from: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=83685.

12. Bulgakov, V. M., Adamchuk, V. V., Chernysh, O. M., Berezovy, M. G., Kaletnik, H. M., & Yaremenko, V. V. (2020). *Applied mechanics. textbook*. K.: Center for Educational Literature, 2020. 906 p.

13. Solona, O., Derevenko, I., & Kupchuk, I. (2019). Determination of plasticity for pre-deformed billet. *Solid State Phenomena*, 291, 110-120.

RESULTS OF LABORATORY STUDIES OF THE EXPANDATE FORMATION PROCESS

The expanded preparation of feeds is carried out using high-temperature (80–140 °C) expanders. These expanders perform the task of preparing food products and feeds under high pressure (1–10 MPa). The expansion process is accompanied by chemical changes such as denaturation of proteins, amino acids, vitamins, starch, and enzymes. Additionally, there is a transformation of the physical and mechanical properties of the feed components, converting them into expandates.

The laboratory research aims to establish the regularities of the compression pressure changes with the deformation of feed components and the density of the obtained expandates under various technological parameters. The study explores the impact of the granulometric composition of the feed, its moisture, and temperature on the deformation diagram, representing the relationship between stress and material deformation. For this purpose, testing was conducted using the Heckert FP-100/1 testing machine and additional devices and equipment.

As research factors, the feed's moisture W (10 %, 20 %, 30 %), temperature T (80 °C, 110 °C, 140 °C), and the average particle diameter of ground feed components D_{μ} (0.5 mm, 1.5 mm, 2.5 mm) were selected. The study was conducted using a full-factor experiment, comprising a total of 27 experiments with three repetitions. For each experiment, a relationship of compression pressure changes with deformation (elastic hysteresis) of the feed components $\Delta P(\epsilon_z)$ was obtained.

The research criteria include: the area $S_{\Delta P}$ enclosed inside the elastic hysteresis loop $\Delta P(\epsilon_z)$; the coefficient of mechanical losses (or relative hysteresis) Ψ , calculated as the ratio of the hysteresis loop area $S_{\Delta P}$ to the area enclosed between the stress-strain curve and the abscissa axis, where deformations S_{P1} are plotted; the height of the obtained expandate sample h_a ; and the density of the obtained expandates ρ_a .

As a result of the laboratory research on the expansion process, dependencies of the compression pressure changes with the deformation of feed components $\Delta P(\epsilon_z)$ were



established. Additionally, correlations of the area of the elastic hysteresis loop $S_{\Delta P}$, the coefficient of mechanical losses Ψ , the height of the obtained expandate sample h_a , and the density of the obtained expandates ρ_a with the feed's moisture W , temperature T , and the average particle diameter of ground components D_μ were determined.

By solving the compromise task of minimizing the coefficient of mechanical losses Ψ

and maximizing the density of the obtained expandates ρ_a , the following rational technological parameters were obtained, ensuring the most effective feed expansion process: $D_\mu = 0.5 \text{ mm}$, $T = 119.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $W = 19.1\%$, $\rho_a = 292.9 \text{ kg/m}^3$.

Key words: expands, compresses, compound feed, technological parameters, temperature, pressure, humidity, density, hysteresis, coefficient of mechanical losses.

Відомості про авторів

Алієв Ельчин Бахтияр огли – доктор технічних наук, старший дослідник, професор кафедри інжинірингу технічних систем Дніпровського державного аграрно-економічного університету (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49000, e-mail: aliev@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4006-8803>)

Дудін Володимир Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інжинірингу технічних систем Дніпровського державного аграрно-економічного університету (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49000, e-mail: dudin.v.yu@dsau.dp.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1414-7690>)

Лінко Миколай Олександрович – здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти Дніпровського державного аграрно-економічного університету (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49000, e-mail: niklinko21@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1353-4832>)

Elchyn Aliiev – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of the Departments of Mechanization of Production Processes in Animal Husbandry of Dnipro State Agrarian and Economic University (St. S. Efremova, 25, Dnipro, Ukraine, 49000, e-mail: aliev@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4006-8803>).

Volodymyr Dudin – Ph.D., associate professor, head of the technical systems engineering department of Dnipro State Agrarian and Economic University (St. S. Efremova, 25, Dnipro, Ukraine, 49000, e-mail: dudin.v.yu@dsau.dp.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1414-7690>).

Mykola Linko – recipient of the third educational and scientific level of higher education Dnipro State Agrarian and Economic University (St. S. Efremova, 25, Dnipro, Ukraine, 49000, e-mail: niklinko21@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1353-4832>).