



УДК 636.086.32:631.365.29

DOI: 10.37128/2520-6168-2021-2-15

**ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ ПРОЦЕСУ ДОСУШУВАННЯ  
ПРОДУКТІВ ФРАКЦІЙНОЇ ПЕРЕРОБКИ ЛЮЦЕРНИ****Спірін Анатолій Володимирович**, к.т.н., доцент**Твердохліб Ігор Вікторович**, к.т.н., доцент**Купчук Ігор Миколайович**, к.т.н., доцент**Побережець Юлія Миколаївна**, к. с.-г. н., доцент

Вінницький національний аграрний університет

**Anatolii Spirin**, Ph.D. of Eng. Sc., Associate Professor**Ihor Tverdokhlib**, PhD of Eng. Sc., Associate Professor**Ihor Kupchuk**, Ph.D. of Eng. Sc., Associate Professor**Julia Poberezhets**, Ph.D. of Agr. Sc., Associate Professor

Vinnytsia National Agrarian University

*Дефіцит якісних кормів суттєво гальмує виробництво продукції тваринництва в Україні. Одним з шляхів подолання кризи у виробництві кормів є використання нових високоенергетичних кормів, в тому числі продукцію фракційної переробки люцерни.*

*Для успішної реалізації кожного виду корму, в тому числі і продуктів фракційної переробки люцерни, повинні бути можливість створювати їх запаси, тобто корми потрібно консервувати для успішного зберігання.*

*Найкращим видом консервування кормів є їх висушування. Енергетична ефективність процесу сушіння, тобто втрати поживних речовин, затрати енергії на реалізацію процесу тощо залежить від способу та його режимних параметрів. В даному випадку пропонується проводити процес сушіння в товстому шарі люцернового жому шляхом активного вентиляювання підігрітим повітрям. Для визначення раціональних параметрів процесу, таких як товщина шару, витрати повітря, тривалість досушування необхідно провести теоретичні та експериментальні дослідження.*

*Люцерновий жом, як і більшість вологих рослинних матеріалів, відноситься до капілярно-пористих тіл. Криві сушки цих тіл мають два явно виражених періоди: постійної та падаючої швидкості (або перший та другий періоди сушки). Вологовміст матеріалу при якому відбувається перехід від першого до другого періоду називають критичним.*

*В результаті теоретичних досліджень отримана залежність яка визначає в загальну тривалість процесу сушіння від цілої низки параметрів, зокрема початкового, критичного, рівноважного і кінцевого вологовмісту, питомого навантаження шару матеріалу, вологовбирної здатності повітря, фізично-хімічних властивостей самого матеріалу, які враховуються цілою низкою коефіцієнтів. Для визначення цих коефіцієнтів, а також перевірки адекватності отриманої залежності, були проведені експериментальні дослідження на спеціальній установці. Основними елементами експериментальної установки є вентилятор, електрокалорифер, контейнери з масою, запірною, регульованою та вимірювальною апаратура. За результатами експериментальних досліджень отримані графічні залежності швидкості сушки і тривалості процесу від режимних параметрів.*

**Ключові слова:** корми, жом, сушіння, температура, питома витрата повітря, швидкість сушіння

**Ф. 20. Таб. 1. Рис. 6. Літ. 15.**

---

**1. Постановка проблеми**

Кількість вегетаріанців на Землі поступово збільшується. Але не настільки стрімко щоб людство могло обійтися без продукції тваринництва. Наприклад, в Україні їх зараз нараховують тільки трохи більше 5%. Отже виробництво тваринної продукції є важливою проблемою яку неможливо вирішити без розвинутого кормо-виробництва. Адже саме через дефіцит якісних кормів щорічно в Україні недовиробляються 4 млн. тон молока та майже 0,2 млн. тон м'яса [1].

При цьому потрібно зауважити що наразі постає першочергове завдання – забезпечення саме якісними кормами, тобто корми які мають високий коефіцієнт перетравності.



Традиційні види кормів ( сіно, сінаж, силос тощо ) не можуть забезпечити потрібного рівня перетравності, особливо для нових високо продуктивних порід тварин [2]. Дану проблему можна вирішити шляхом доповнення до традиційного раціону нових високоенергетичних видів кормів.

## 2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

На перетравність поживних речовин корму впливає співвідношення в раціоні між перетравним протеїном і без азотистими речовинами. Раціонального поєднання амінокислотного складу і високої енергетичної цінності можна досягти при фракційній переробці зеленої маси люцерни в результаті якої отримують два основних компоненти: білково-вітамінна паста та жом [3]. Автори вже зупинялися в [3] на питаннях технології фракційної переробки люцерни та поживних якостей отриманого корму, тому перейдемо відразу до питання сушіння однієї із фракцій, а саме тому, який виходить після віджиму подрібненої рослинної маси. Чому саме досушування жому? Для ефективного використання фракцій корму їх потрібно накопичувати, зберігати, а отже якимось чином консервувати. Найбільш розповсюдженим способом консервування кормів саме і є їх сушіння, тобто процес доведення вологовмісту матеріалу до такого рівня при якому він може зберігатися тривалий час без погіршення його якості.

Однак втрати поживних речовин, а отже і якість корму, енергозатрати на процес сушіння залежать від способу та режимних параметрів процесу, які повинні бути науково обґрунтовані для конкретних умов виробництва. Одним із ефективних та широко розповсюдженим способом сушіння аналогічних матеріалів є активне вентилявання атмосферним або підігрітим повітрям нерухомого щільного шару матеріалу. Знання закономірностей протікання процесу сушіння в щільному шарі дасть можливість керувати цим складним процесом, визначити шляхи більш повного використання сушильного потенціалу повітря, визначити раціональну витрату повітря яке продувається через шар матеріалу.

Загальні теоретичні питання трансформації тепла та речовини під час процесу сушіння вирішені для тіл класичної форми. Але в реальному випадку потрібно дещо спростувати цей процес і приймати певні допущення [4,5]. Наприклад в [6] досліджується процес сушіння листостеблових матеріалів тільки з точки зору масо обмінних процесів, в [7] враховується внутрішнє джерело тепла, яке знаходиться в товстому шарі, в [8] розроблена аналітична математична модель процесів нагріву і сушіння рослинних матеріалів у товстому нерухомому шарі щільність якого змінюється за висотою. В роботі [9] розглянуто питання моделювання режимів сушіння дисперсних матеріалів в реальних сушарках колонного типу. Ці та багато інших теоретичних досліджень реалізуються в реальних машинах, агрегатах для переробки та зберігання продукції рослинництва [10, 11].

Але не зважаючи на такий широкий спектр теоретичних та експериментальних досліджень, як ми вже вказували, в кожному конкретному випадку потрібно проводити дослідження для обґрунтування способу і визначення раціональних параметрів процесу сушіння рослинної сировини. Отже такі дослідження по сушінню продуктів переробки люцерни є актуальні.

## 3. Мета дослідження

Підвищення ефективності процесу досушування продуктів фракційної переробки люцерни шляхом отримання аналітичних залежностей для аналізу процесу сушіння з подальшим їх використанням, для обґрунтування режимних параметрів роботи реального сушильного обладнання.

## 4. Виклад основного матеріалу

Більшість вологих рослинних матеріалів та їх компонентів, в тому числі і жом із зелених рослин люцерни, відносяться до капілярно-пористих тіл. Криві сушки цих тіл мають два явно виражених періоди: постійної та падаючої швидкості.

Рівняння кривої швидкості сушки в першому періоді має вигляд [12, 13, 14]:

$$-dw/d\tau = N = \text{const} \quad (1)$$

де  $dw/d\tau$  - швидкість сушки  $\frac{\text{кг}_{\text{вол.}}}{\text{кг}_{\text{а.с.р.}} \cdot \text{год}}$ ;  $N$  – швидкість сушки в першому періоді,  $\tau$  – час, год.

Аналіз результатів експериментальних досліджень показує, що для опису процесу сушки люцернового жому в другому періоді можна скористатися рівнянням [12, 13]:



$$\frac{dw}{d\tau}/N = \Psi = \frac{(W - W_p)^m}{A + \beta (W - W_p)^m} \quad (2)$$

де  $\Psi$  – зведена швидкість сушки;  $W$ ,  $W_p$  – відповідно поточний та рівноважний вологовміст матеріалу,  $\frac{\text{кг}_{\text{вол.}}}{\text{кг}_{\text{а,с,р}}}$ .

Про рівноважний вологовміст продуктів фракційної переробки люцерни ми вже писали в [ 3 ]. Показник ступеня  $m$  характеризує взаємозв'язок вологи з матеріалом або показником внутрішньої дифузії вологи і не залежить від параметрів шару і вологовмісту матеріалу. Безрозмірні коефіцієнти  $A$  і  $\beta$  залежить від параметрів шару матеріалу ( в основному від його товщини).

Час за який середній вологовміст шару матеріалу зменшується від початкового  $W_0$  до кінцевого  $W_2$  значення, складається із тривалості сушки в першому  $\tau_1$  і другому  $\tau_2$  періодах:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (3)$$

Проінтегруємо рівняння (1) в межах від  $W_0$  до  $W_{\text{кр}}$ , а рівняння (2) від  $W_{\text{кр}}$  до  $W_2$ , і в результаті отримаємо вирази для визначення тривалості сушіння люцернового жому відповідно в першому і другому періодах:

$$\tau_1 = \frac{W_0 - W_{\text{кр}}}{N} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{1}{N} \left[ A \int_{W_2}^{W_{\text{кр}}} \frac{dw}{(w - W_p)^m} + \beta (W_{\text{кр}} - W_2) \right], \quad (5)$$

де  $W_{\text{кр}}$  – середній критичний вологовміст шару матеріалу,  $\text{кг}/\text{кг}$ , тобто вологовміст при якому перший період сушки переходить в другий.

Після підстановки в рівняння (3) значення  $\tau_1$  та  $\tau_2$  з (4) і (5), а також враховуючи що для капілярно-пористих тіл, до яких відноситься і жом люцерни, показник ступеня  $m=1$  [13], отримаємо рівняння для визначення загальної тривалості сушки шару жому:

$$\tau = \frac{1}{N} \left[ W_0 - W_{\text{кр}} + A \ln \frac{W_{\text{кр}} - W_p}{W_2 - W_p} + \beta (W_{\text{кр}} - W_2) \right], \quad (6)$$

В рівнянні (6) коефіцієнти  $A$  і  $\beta$ , значення критичного та рівноважного вологовмісту визначаються експериментально.

Швидкість сушки матеріалу в першому періоді  $N$  залежить від параметрів шару (висота, його щільність) і теплоносія ( температура, вологість, швидкість та витрата його) [14, 15].

В результаті аналітичних досліджень було отримано критеріальне рівняння за допомогою якого можна визначити  $N$ :

$$N_{uv} = B \left( \frac{v \rho_n l}{\mu g} \right)^{K_1} \left( \frac{H}{l} \right)^{K_2}, \quad (7)$$

де  $V$  – швидкість повітря та вільний переріз;  $\rho_n$  – щільність повітря;  $l$  – визначальний розмір частинок (використовують, як правило, середньозважену довжину частинок);  $\mu$  – динамічна в'язкість повітря;  $H$  – висота шару;  $B$  -  $k_1$ ,  $k_2$  – константи які визначаються експериментальним шляхом;

В рівнянні (7)  $N_{uv}$  – видозмінений критерій Нуссельта для об'ємного коефіцієнта теплообміну. Його значення можна визначити з наступного рівняння [13]:

$$N_{uv} = \frac{\rho_o l^2}{\lambda_n} \cdot \frac{N}{\Delta P}, \quad (8)$$

де  $\rho_o$  – щільність часток тому в їх природному структурному стані;  $\lambda_n$  – коефіцієнт масо провідності повітря;  $\Delta P$  – середня різниця парціальних тисків пари біля поверхні частинок і в повітрі.

Із рівнянь (7) і (8) можна отримати вираз для визначення швидкості сушки в першому періоді:

$$N = B \frac{\lambda_n \Delta P}{\rho_o l^2} \cdot \left( \frac{v \rho_n l}{\mu g} \right)^{K_1} \cdot \left( \frac{H}{l} \right)^{K_2}, \quad (9)$$

Середню різницю парціальних тисків  $\Delta P$  в рівнянні (9) можна виразити через початковий сушильний потенціал який характеризується різницею вологовмісту адіабатично насиченого повітря і того що поступає в шар; висоту шару  $H$  – через питоме навантаження матеріалу на одиницю площини сітки на якій він знаходиться; швидкість повітря на вільний переріз  $V$  – через питому витрату повітря  $G_n$ , тобто

$$\Delta P = z_1 (d_n - d_1) = z_1 \Delta d_1; H = z_2 \cdot \rho; V \rho_n = z_3 G_n \rho_n, \quad (10)$$

де  $z$ ,  $z_2$ ,  $z_3$  – коефіцієнт пропорційності.

Після деяких перетворень рівняння (9) отримує:

$$N = (G_n \rho_n)^k P^{k_2} \Delta d_1 \left[ \frac{B z_1 z_2^{k_2} z_3^{k_1} \lambda_n}{\mu \cdot g \cdot \rho_o \cdot l^{2-k_1}} \right] \quad (11)$$



Після підстановки рівняння (6) значення  $N$  із рівняння (11), отримаємо рівняння для визначення загальної тривалості сушки шару жому:

$$\tau = \frac{W_0 - W_{kp} + A I_n \frac{W_{kp} - W_0}{W_2 - W_p} + \beta (W_{kp} - W_2)}{G_n \rho_n K_1 p K_2 \Delta d_1 \left[ \frac{B z_1 z_2^2 z_3^2 \lambda_n}{\mu \cdot g \cdot \rho_0 \cdot l^2 - K_1} \right]} \quad (12)$$

Дана аналітична залежність визначає загальну тривалість сушіння від цілої низки параметрів, зокрема початкового, критичного, рівноважного і кінцевого вологовмісту, питомої витрати повітря що продувається через шар матеріалу питомого навантаження шару матеріалу, температури і вологості повітря, фізико-хімічних властивостей матеріалу які враховуються коефіцієнтами  $m=1$ ,  $A$  і  $\beta$ .

Початковий вологовміст визначається ступенем механічного віджиму зелених рослин. Цей вологовміст, а також кінцевий, задаються умовами технологічного процесу. Початковий сушильний потенціал повітря визначається по  $I-d$  діаграмі, виходячи з середніх значень його температури і його вологості. Значення показників ступеня  $k_1$  і  $k_2$ , а також коефіцієнтів  $A$ ,  $\beta$ ,  $B$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$  визначаються експериментальним шляхом.

Експериментальні дослідження процесу сушки жому з люцерни в товстому шарі проводили на лабораторній установці схема якої наведена на (рис.1).

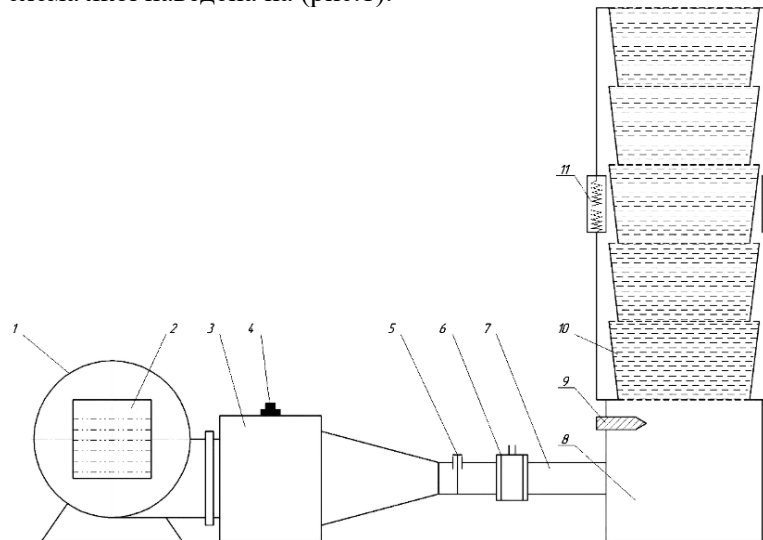


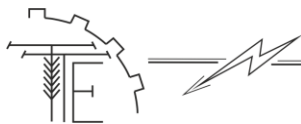
Рис. 1. Схема лабораторної установки:

**1 – вентилятор; 2 – електричний калорифер; 3 – розподільна камера; 4 – регулятор температури; 5 – заслінка; 6 – діафрагма; 7 – повітропровід; 8 – змішувальна камера; 9 – датчик температури; 10 – контейнер завантажувальний; 11 – пристрій для герметизації контейнерів.**

Основними елементами лабораторної установки є вентилятор 1 ЦД–70№8, електрокалорифер 2 ПНЕ-67,5, розподільна камера 3, повітропровід 7, контейнери із масою 10, запірні, регульовальна та вимірювальна апаратура. Витрату повітря контролювали за допомогою діафрагми 6 встановленої на прямолінійній ділянці повітропроводу 7. У змішувальній камері 8 встановлено термометр 9 для контролю температури повітря на вході в сушильну камеру. У камері розміщені 5-10 (в залежності від необхідної висоти шару матеріалу контейнерів) 10 для зразків досліджуваного матеріалу. Вони мають форму зрізаної чотирикутної піраміди з кутом нахилу бічної поверхні  $5^\circ$ , висотою 0,2 м і площею нижньої основи  $0,1 \text{ м}^2$ . Дно кожного контейнера виготовлено із сітки з вічками  $1,5 \times 1,5 \text{ мм}$ , по периметру якого наклеєна м'яка гума. Герметизація між контейнерами забезпечується натяжним пристроєм 11, а бічні стінки контейнерів теплоізовані.

Для автоматичного регулювання температури сушильного агента (повітря) використовували датчик 4, встановлений в розподільній камері 3. Лабораторна установка має три сушильних колонки для проведення дослідів в трьох повтореннях. Швидкість повітря в робочій частині каналу заміряли за допомогою діафрагми і тягонапорометра. Одночасно психрометричними термометрами з ціною поділу  $0,2$  градуси заміряли температуру повітря на вході в шар матеріалу.

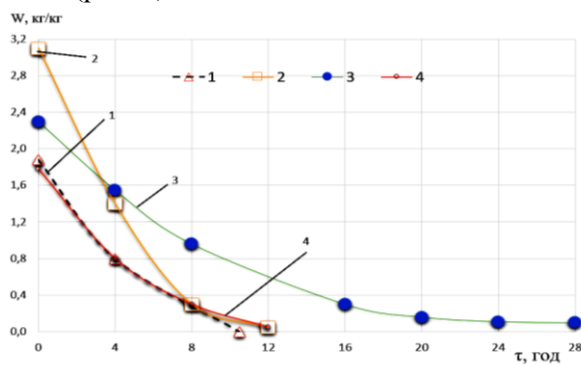
Вологовміст матеріалу в процесі сушки визначали періодичним зважуванням контейнерів зі зразками на лабораторних вагах ТВЕ-12-05. Початковий і кінцевий вологовміст матеріалу визначали за стандартною методикою ДСТУ 29144:2009



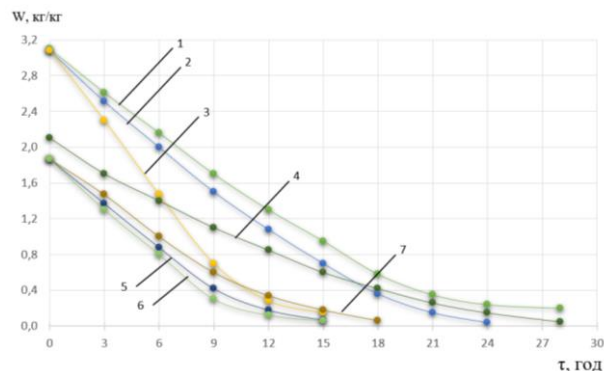
Режимні параметри матеріалу (жом люцерни) і сушильного агента (повітря) при проведенні дослідів були наступними: середня початкова температура сушильного агента змінювалась послідовно з інтервалом 10 градусів від 297 до 327К, питома витрата повітря – з інтервалами 200-300 м<sup>3</sup>/(год · м<sup>2</sup>) від 340 до 1600 м<sup>3</sup>/(год · м<sup>2</sup>), а питома навантаження шару матеріалу змінювалось від 7 до 100 кг/м<sup>2</sup>.

Аналіз великої кількості кривих, які були отримані при різних режимах, дозволив визначити окремі залежності швидкості сушки в першому періоді і загальну тривалість сушки шару люцернового жому від початкового сушильного потенціалу (рис. 2), питомої витрати повітря, питомого навантаження шару.

Встановлено що швидкість сушки шару в першому періоді прямо пропорційне початковому сушильному потенціалу повітря:  $N \sim \Delta d$  що згоджується з рівнянням (11). Зі збільшенням питомої витрати повітря яке продувається через шар матеріалу, спостерігається значне зменшення тривалості сушіння (рис. 3).

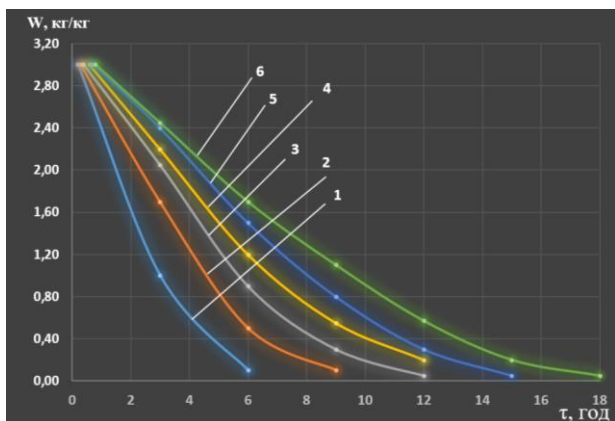


**Рис. 2. Кінетика сушіння від початкового сушильного потенціалу  $\Delta d$  (г.вол./кгс.н.) при  $P_{ш}=21,0$  кг/м<sup>2</sup>;  $G_n=500$  м<sup>3</sup>/год:**  
1 – 10,2; 2 – 4,5; 3 – 6,7; 4 – 10,0.

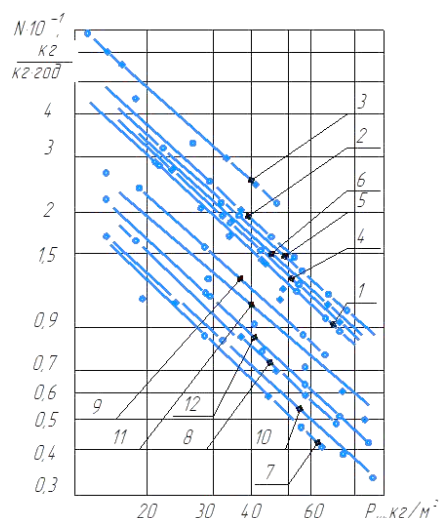


**Рис. 3. Кінетика сушіння від питомої витрати повітря  $G_n$  (м<sup>3</sup>/год) при  $P_{ш}=44,2$  кг/м<sup>2</sup>;  $\Delta d = 10$  г.вол./кгс.н.:**  
1 – 500; 2 – 560; 3 – 1115;  
4 – 340; 5 – 875; 6 – 910; 7 – 480.

Якщо в логарифмічних координатах побудувати залежність  $N$  від  $G_n \rho_n$ , то отримаємо пряму лінію, тангенс кута нахилу якої до осі абсцис дорівнює показнику ступеня  $K_1$  рівнянь (11) і (12). В межах зміни  $G_n$  від 340 до 1300 м<sup>3</sup>/год  $K_1 = 0,65$  тобто  $N \sim \rho_n G_n^{0,65}$ . При аналізі впливу питомого навантаження шару люцернового жому на швидкість сушки і тривалість процесу встановлено що нахил кривих сушки зі збільшенням питомого навантаження зменшується (рис. 4). Середня швидкість сушки при цьому різко зменшується (рис. 5).



**Рис. 4. Кінетика сушіння від питомого навантаження матеріалу  $P_{ш}$  (кг/м<sup>2</sup>) при  $\Delta d = 10,1$  г.вол./кгс.н.,  $G_n = 500$  м<sup>3</sup>/год:**  
1 – 13,8; 2 – 21,6; 3 – 28,9; 4 – 36,1; 5 – 43,5; 6 – 50,5.



**Рис. 5. Залежність швидкості сушіння матеріалу в першому періоді від питомого навантаження (умови дослідів наведені в табл. 1).**





Таблиця 1

## Умови проведення дослідів

№	Режимні параметри шару матеріалу і повітря					
	$t_1, K$	$\varphi, \%$	$G_p, m^3 / год$	$\Delta d, \text{г}_{\text{вол}} / \text{кг}_{\text{с.п.}}$	$W_0, \text{кг} / \text{кг}$	$K_2$
1	320,8	11,0	500	9,35	3,10	0,96
2	326,6	7,5	560	10,90	3,10	0,92
3	324,2	9,0	1115	10,40	3,10	0,98
4	333,7	15,0	1060	7,60	1,88	0,99
5	315,1	14,0	1000	8,30	1,88	0,99
6	312,9	16,0	1040	7,50	1,88	0,97
7	302,1	38,0	340	4,00	2,28	0,95
8	303,3	35,0	480	4,40	2,28	0,93
9	303,5	35,5	980	4,60	2,28	0,95
10	297,4	45,0	560	2,80	1,62	0,94
11	298,9	44,0	972	3,40	1,62	0,98
12	304,0	32,5	1094	3,31	1,62	0,86

Із рис. 5 видно що незалежно від режиму сушки залежності  $N$  від  $P$  являють собою паралельні прямі. Тангенс кута нахилу цих прямих до осі абсцис чисельно дорівнює показнику ступеня  $K_2$  рівнянь (11) і (12) і становить  $-0,972$ , тобто наближається до  $-1$ . Множник в квадратних дужках в цих рівняннях при зміні режимних параметрів шару і повітря зберігає постійне значення і дорівнює  $0,0107$ .

Таким чином, обробка експериментальних даних дозволила отримати наступне рівняння для визначення швидкості сушки шару в першому періоді.

$$N = \frac{0,0107}{P_{\text{ш}}} \Delta d_1 (G_n \rho_n)^{0,65} \quad (13)$$

Для подальших досліджень зробимо деякі перетворення у рівнянні (5): візьмемо інтеграл, а потім помножимо обидві частини рівняння на  $N/(W_{kp} - W_2)$ , і для  $m=1$  отримаємо:

$$\frac{N\tau_2}{W_{kp} - W_2} = \frac{A}{W_{kp} - W_2} \ln \frac{W_{kp} - W_p}{W_2 - W_p} + \beta \quad (14)$$

Для визначення коефіцієнтів  $A$  і  $\beta$  будували за експериментальними кривими тривалості сушіння для різних значень  $W_2$  залежність величини  $N\tau_2/(W_{kp} - W_2)$  як функції від

$$\left( \frac{1}{W_{kp} - W_2} \cdot \ln \cdot \frac{W_{kp} - W_p}{W_2 - W_p} \right) \text{ при } P_{\text{ш}} = \text{const.}$$

В результаті отримали пряму лінію яка по осі ординат відсікає відрізок який дорівнює  $\beta$ , а тангенс кута нахилу цієї лінії до осі абсцис визначає коефіцієнт  $A$ .

Встановлено що на величину коефіцієнтів  $A$  та  $\beta$  впливає питоме навантаження матеріалу. Залежність цих коефіцієнтів від величини  $P_{\text{ш}}$  наведена на (рис. 6).

Представлені на рис. 6 (а, б) залежності можна описати емпіричними залежностями:

$$A = 13,25 \cdot P_{\text{ш}}^{-1} \quad (15)$$

$$\beta = 0,24 (P_{\text{ш}} - 10)^{0,3} \quad (16)$$

Результати обробки експериментальних даних дозволяють отримати аналітичні залежності для визначення основних режимних параметрів процесу сушки люцернового жому товстому шару. Так, наприклад, необхідно питому витрату повітря можна визначити з наступної залежності:

$$G_n = \left\{ \frac{[W_0 - W_{kp} + \ln \frac{W_{kp} - W_p}{W_2 - W_p} + \beta (W_{kp} - W_2) \cdot P_{\text{ш}}]}{0,0107 \rho_n^{0,65} \Delta d_1 \cdot \tau} \right\}^{1,54} \quad (17)$$

Аналогічно можна отримати залежності для визначення часу сушки в першому і другому періоді для любого поточного вологовмісту  $W$ :

$$\tau_1 = \frac{P_{\text{ш}} (W_0 - W_{kp})}{0,0107 (\rho_n \cdot G_n)^{0,65} \Delta d_1} \quad (18)$$

$$\tau_2 = \frac{[13,5 \ln \frac{W_0 - W_p}{W - W_p} + 0,24 P_{\text{ш}} (P_{\text{ш}} - 10)^{0,3} (W_0 - W)]}{0,0107 (\rho_n G_n)^{0,65} \Delta d_1} \quad (19)$$

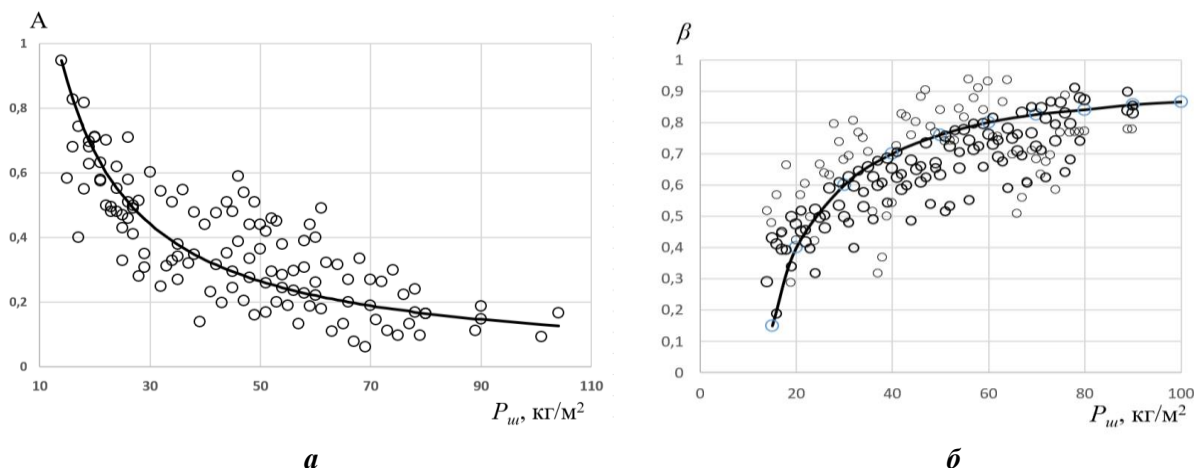


Рис. 6. Залежність безрозмірних коефіцієнтів А (а) і β (б) від питомого навантаження матеріалу

З рівняння (18) і (19) випливає, що тривалість процесу сушіння шару люцернового жому в першому періоді не залежить від властивостей матеріалу, а є функцією температури, вологості і питомої витрати повітря, а також питомого навантаження матеріалу на одиницю площі сушарки.

В другому періоді тривалість процесу сушки, окрім цих факторів, залежить від властивостей матеріалу, що враховується коефіцієнтами  $m$ ,  $A$ ,  $\beta$ .

Для перевірки отриманих аналітичних залежностей розрахункові дані по тривалості сушіння шару жому були порівняні з експериментальними. Умови дослідів наведені в таблиці 1. Встановлено, що відхилення експериментальних і розрахункових значень тривалості сушки знаходиться в межах  $\pm 9\%$ , що є прийнятним результатом для подібних процесів.

Таким чином, за відомими температурою і вологістю повітря, середній початковий вологовміст матеріалу, питома навантаження шару матеріалу на одиницю площі сушарки, час сушки, можна за допомогою залежності (17) визначити раціональну витрату повітря, яке продувається через шар. Так можна підібрати раціональне обладнання (вентилятор) при проектуванні установок для сушіння жому.

В аналітичних залежностях присутні також рівноважний  $W_p$  та критичний  $W_{kp}$  вологовміст. Про рівноважний вологовміст і способи його визначення автори вже писали [3]. Критичний вологовміст матеріалу можна визначити з виразу для зведеної швидкості сушки  $\Psi$ , яка при  $W = W_{kp}$  дорівнює одиниці. З рівняння (2) з урахуванням (15) і (16) отримаємо:

$$W_{kp} = \frac{13,25}{P_{w0} - 0,24 P_w (P_{w0} - 10)^{0,3}} + W_p \quad (20)$$

Як бачимо, критичний вологовміст (тобто вологовміст при якому закінчується перший період сушки і починається другий) не залежить від властивостей матеріалу, як і було сказано вище (формула 18).

## 5. Висновки

1. Тривалість сушіння в першому періоді люцернового жому в товстому шарі не залежить від властивостей матеріалу, а тільки від параметрів шару і повітря що його продуває.
2. Отримані залежності для визначення раціональних параметрів процесу сушіння люцернового жому. Данні залежності можна використати для підбору обладнання сушарки для сушіння люцернового жому.

## Список використаних джерел

1. Петриченко В. Ф., Корнійчук О. В., Бабич А. О. Концепція розвитку кормовиробництва в Україні на період до 2025. 12 с. URL: <http://fri.vin.ua/>
2. Кулик М. Ф., Пономаренко М. М., Дутко М. Ф. Енерговіддача кормів різних технологій виробництва. К.: Урожай, 1991. 208с.
3. Спирін А. В., Твердохліб І. В. Рівноважний вологовміст продуктів переробки люцерни. *Вібрації в техніці технологіях*. 2019. №1 (96). С. 118–122.
4. Активне вентильовання та сушіння зерна / О. І. Гапонюк, М. В. Остапчук, Г. М. Станкевич, І. І. Гапонюк. Одеса: Поліграф, 2014. 324 с.
5. Kotov Boris, Spirin Anatoly, Kalinichenko Roman, Bandura Valentyna, Polievoda Yurii, Tverdokhlіb Ihor. Determination the parameters and modes of new heliocollectors constructions work for drying



- grain and vegetable raw material by active ventilation. *Research in Agricultural Engineering*. 2019. №65. С. 20–24. <https://doi.org/10.17221/73/2017-RAE>
6. Котов Б. І., Кузьменко В. Ф. Математична модель динаміки сушіння листостеблових матеріалів активним вентиляванням. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2013. №13. С. 32–38.
  7. Котов Б. І., Калініченко Р. К. Аналітичне дослідження тепломасоперемолу в товстому шарі матеріалу при двостадійному процесі сушіння зерна. *Науковий вісник НУБіП України*. 2011. №166, ч.4. С. 138–147.
  8. Котов Б. І., Спирін А. В., Калініченко Р. А. Тепло – і масообмін при сушінні сільськогосподарських рослинних матеріалів у щільному нерухомому шарі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. №2 (94). С. 41–44.
  9. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Спирін А. В. Моделювання режимів сушіння дисперсних матеріалів в безперервних сушарках колонкового типу. *Техн. сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2016. №6. С. 69–74.
  10. Гапоанюк І. О. Вітчизняні зерносушарки: стан та перспективи. Зберігання і переробка зерна. - 2014. №2. С. 25–29.
  11. Машины, агрегаты та комплексы для післязбиральної обробки і зберігання зернових культур / за ред. В. І. Кравчук. Дослідницьке: Укр. НДПІВТ, 2011. 224 с.
  12. Bandura V., Kalinichenko R., Kotov B., Spirin A. Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 4(8 (94), P. 50–58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139314>
  13. Kotov B. I., Spirin A. B., Tverdokhlib I. V., Polyevoda Y. A., Hryshchenko V. O., Kalinichenko R. A. Theoretical researches on cooling process regularity of the grain material in the layer. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. №54(1), P. 87–94.
  14. Gunko, I., Hraniak, V., Yaropud, V., Kupchuk, I., Rutkevych V. Optical sensor of harmful air impurity concentration. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2021.7:76–79. <https://doi.org/10.15199/48.2021.07.15>.
  15. Kuznietsova, I., Bandura, V., Paziuk, V., Tokarchuk, O., Kupchuk, I. Application of the differential scanning calorimetry method in the study of the tomato fruits drying process. *Agraarteadus*, 2020. 31(2), P. 173–180. <https://doi.org/10.15159/jas.20.14>

### References

- [1] Petrichenko, V.F., Korniychuk, O.V., Babych, A.O. (2020). *Kontseptsiiia rozvytku kormovyrobnystva v Ukraini na period do 2025 [The concept of development of feed production in Ukraine for the period up to 2025]*, URL: <http://fri.vin.ua/> [In Ukrainian].
- [2] Kulik, M.F., Ponomarenko, M.M., Dutko, M.F. (1991). *Enerhoviddacha kormiv riznykh tekhnolohii vyrobnystva [Energy efficiency of feeds of different production technologies]*. K.: Urozhay, 208. [In Ukrainian].
- [3] Spirin, A.V., Tverdokhlib, I.V. (2019). Rinvovazhnyi volohovmist produktiv pererobky liutserny [Equilibrium moisture content of alfalfa processing products]. *Vibratsii v tekhnitsi tekhnolohiiakh*. 1(96), 118–122. [In Ukrainian].
- [4] Haponiuk, O.I., Ostapchuk, M.V., Stankevych, H.M., Haponiuk, I.I. (2014). *Aktyvne venteliuvannia ta sushinnia zerna [Active ventilation and grain drying]*. Odessa: Polihraf. [In Ukrainian].
- [5] Kotov, B., Spirin, A., Kalinichenko, R., Bandura V., Polievoda, Yu., Tverdokhlib, I. (2019). Determination the parameters and modes of new heliocollectors constructions work for drying grain and vegetable raw material by active ventilation. *Research in Agricultural Engineering*. 65, 20–24. <https://doi.org/10.17221/73/2017-RAE>
- [6] Kotov, B.I., Kuzmenko, V.F. (2013). Matematychna model dynamiky sushinnia lystosteblovykh materialiv aktyvnym ventyliuvanniam [Mathematical model of the dynamics of drying of leaf-stem materials in active ventilation]. *Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekholohichnoho universytetu*. 13, 32–38. [In Ukrainian].
- [7] Kotov, B.I., Kalinichenko, R.K. (2011). Analitychne doslidzhennia teplomasoperemolu v tovtstomu shari materialu pry dvostadiinomu protsesi sushinni zerna [Analytical dosage of heat and mass grinding in a good ball of material in a two-stage process of drying grain]. *Naukovy visnyk NUBiP Ukrainy*. 166(4), 138–147. [In Ukrainian].
- [8] Kotov, B.I., Spirin, A.V., Kalinichenko, R.A. (2016). Teplo – i masoobmin pry sushinni silskohospodarskykh roslennykh materialiv u shchilnomu nerukhomomu shari. [Warmth - and mass transfer when dry silky and agricultural materials in a crappy, unstable ball]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2(94), 41–44. [In Ukrainian].
- [9] Kotov, B.I., Kalinichenko, R.A., Spirin, A.V. (2016). Modeliuvannia rezhymiv sushinnia dyspersnykh materialiv v besperervnykh susharkakh kolonkovoho typu. [Modeling the modes of drying of dispersed materials in continuous column dryers.]. *Tekhn. servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho*





- kompleksiv. 6, 69–74. [In Ukrainian].*
- [10] Напоаниук, І.О. (2014). Vitchyzniani zernosusharky: stan ta perspektyvy. [Domestic grain dryers: status and prospects]. *Zberihannia i pererobka zerna. 2*, 25–29. [In Ukrainian].
- [11] Mashyny, ahrehaty ta komplekсы dlia pisliazbyralnoi obrobky i zberihannia zernovykh kultur. [Machines, units and complexes for post-harvest processing and storage of cereals]/ za red. V.I. Kravchuk. (2011). Doslidnytske: Ukr. NDIPVT. [In Ukrainian].
- [12] Bandura, V., Kalinichenko, R., Kotov, B., & Spirin, A. (2018). Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8 (94), 50–58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139314>
- [13] Kotov, B.I., Spirin, A.B., Tverdokhlib, I.V., Polyevoda, Y.A., Hryshchenko, V.O., Kalinichenko, R.A. (2018). Theoretical researches on cooling process regularity of the grain material in the layer. *INMATEH – Agricultural Engineering. 54(1)*, 87–94. [In English].
- [14] Gunko, I., Hraniak, V., Yaropud, V., Kupchuk, I., Rutkevych V. (2021). Optical sensor of harmful air impurity concentration. *Przegląd Elektrotechniczny*, 7:76-79. <https://doi.org/10.15199/48.2021.07.15>. [In English].
- [15] Kuznietsova, I., Bandura, V., Paziuk, V., Tokarchuk, O., Kupchuk, I. (2020). Application of the differential scanning calorimetry method in the study of the tomato fruits drying process. *Agraarteadus*, 31(2): 173–180. <https://doi.org/10.15159/jas.20.14> [In English].

### ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ДОСУШИВАНИЯ ПРОДУКТОВ ФРАКЦИОННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЛЮЦЕРНЫ

Дефицит качественных кормов существенно тормозит производство продукции животноводства в Украине. Одним из путей преодоления кризиса в производстве кормов является использование новых высокоэнергетических кормов, в том числе продукцию фракционной переработки люцерны.

Для успешной реализации каждого вида корма, в том числе и продуктов фракционной переработки люцерны, наводнением быть возможность создавать их запасы, то есть корма нужно консервировать для успешного хранения.

Лучший видом консервирования кормов является их высушивание. Энергетическая эффективность процесса сушки, то есть потеря питательных веществ, затраты энергии на реализацию процесса т.п. зависит от способа и его режимных параметров. У данного случая предлагается проводить процесс сушки в толстом слое люцерновой жомы путем активного вентилирования подогретого воздуха. Для определения рациональных параметров процесса, таких как толщина слоя, расходы воздуха, длительность досушивания и патенты провести теоретические и экспериментальные исследования.

Люцерновой жом, как и большинство влажных растительных материалов, относится к капиллярно-пористых тел. Кривы сушки этих тел юют два явно выраженного периода: постоянной и падающей скорости (или первый и второй период сушки). Влагосодержание материала, при котором происходит переход от первого к другому периода называют критическим.

В результате теоретических исследований получил зависимость, которая определяет в общую длительность процесса сушки от целого ряда параметров, в частности начального, критического, равновесного и конечного влагосодержания, питом нагрузки шара материала, способности воздуха поглощать воду, физически химические свойства самого материала, которые учитываются целым рядом коэффициентов. Для определения этих коэффициентов, а также проверка адекватности полученной зависимости, были проведены экспериментальные исследования на специальной установке. Основными элементами экспериментальной установки является вентилятор, электрокалорифер, контейнеры с массой, запорная, регулировочная и измерительная аппаратура. По результатам экспериментальных исследований получили графические зависимости скорости сушки и продолжительности процесса от режимных параметров.

**Ключевые слова:** люцерна, жом, сушка, температура, удельный расход воздуха, скорость сушки.

**Ф. 20. Таб. 1. Рис. 6. Лит. 15.**

### SUBSTANTIATION OF ENERGY EFFICIENT REGIMES OF DRYING PRODUCTS FRACTIONAL PROCESSING OF ALFALFA

*Summary: Shortage of quality feed significantly slows down the production of livestock products in Ukraine. One of the ways to overcome the crisis in the production of feed is the use of new high-energy feed, including the products of fractional processing of alfalfa.*

*For the successful implementation of the skin type of feed, including the products of fractional processing of alfalfa, there should be an opportunity to create their reserves, feed should be canned for successful storage.*



*The best way to preserve food is to dry it. Energy efficiency of the drying process, ie loss of nutrients, energy costs for the implementation of the process, etc. It depends on the method and its mode parameters. In this case, it is proposed to carry out the drying process in a thick layer of alfalfa pulp by active ventilation with heated air. To determine the rational parameters of the process, such as layer thickness, air flow, drying time and patents to conduct theoretical and experimental studies.*

*Alfalfa pulp, like most wet plant materials, belongs to the capillary-porous bodies. The drying blood of these bodies has two distinct periods: constant and decreasing speeds (or the first and second drying periods). The moisture content of the material at which the transition from the first to the second period is called critical.*

*As a result of theoretical research has obtained a dependence that determines the total duration of the drying process on a number of parameters, including initial, critical, equilibrium and final moisture content. To determine these coefficients, as well as to check the adequacy of the obtained dependence, experimental studies were conducted on a special installation. The main elements of the experimental setup are a fan, electric heater, containers with mass, shut-off, control and measuring equipment. According to the results of experimental research, graphical dependences of drying speed and process duration on regime parameters are obtained.*

**Key words:** alfalfa, pulp, drying, temperature, specific air consumption, drying rate

**F. 20. Table. 1. Fig. 6. Ref. 15.**

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Спірін Анатолій Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [spirinanatoly16@gmail.com](mailto:spirinanatoly16@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0002-4642-6205>).

**Твердохліб Ігор Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [igor\\_tverdokhlib@yahoo.com](mailto:igor_tverdokhlib@yahoo.com), <http://orcid.org/0000-0003-1350-3232>).

**Купчук Ігор Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [kupchuk.igor@i.ua](mailto:kupchuk.igor@i.ua), <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

**Побережець Юлія Миколаївна** – кандидат с.-г. наук, доцент кафедри ветеринарії, гігієни та розведення тварин Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [julia.p08@ukr.net](mailto:julia.p08@ukr.net), <http://orcid.org/0000-0002-1727-6105>).

**Спирин Анатолій Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: [spirinanatoly16@gmail.com](mailto:spirinanatoly16@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0002-4642-6205>).

**Твердохлеб Игорь Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: [igor\\_tverdokhlib@yahoo.com](mailto:igor_tverdokhlib@yahoo.com), <http://orcid.org/0000-0003-1350-3232>).

**Купчук Игорь Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: [kupchuk.igor@i.ua](mailto:kupchuk.igor@i.ua), <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

**Побережец Юлия Николаевна** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры ветеринарии, гигиены и разведения животных Винницкого национального аграрного университета (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380982248856, e-mail: [julia.p08@ukr.net](mailto:julia.p08@ukr.net), <http://orcid.org/0000-0002-1727-6105>).

**Anatolii Spirin** – PhD of Engineering Science, Associate Professor at the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [spirinanatoly16@gmail.com](mailto:spirinanatoly16@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0002-4642-6205>).

**Ihor Tverdokhlib** – PhD of Engineering Science, Associate Professor at the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [igor\\_tverdokhlib@yahoo.com](mailto:igor_tverdokhlib@yahoo.com), <http://orcid.org/0000-0003-1350-3232>).

**Ihor Kupchuk** – Ph.D. of Engineering Science, Associate Professor at the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [kupchuk.igor@i.ua](mailto:kupchuk.igor@i.ua), <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

**Julia Poberezhets** – Ph.D. of Agricultural sciences, Associate Professor of the Department of Veterinary Medicine, Hygiene and Animal Breeding of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, +380982248856, e-mail: [julia.p08@ukr.net](mailto:julia.p08@ukr.net), <http://orcid.org/0000-0002-1727-6105>).