

УДК631.363

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.112-121>

**В. Ю. Дудін**, доц., канд. техн. наук, **В.Б. Говоруха**, проф., д-р фіз.-мат. наук  
*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна*  
*e-mail: dudin.v.yu@dsau.dp.ua*

## Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів стрічково-гвинтового змішувача сипких кормів

Метою роботи було обґрунтування режимних параметрів роботи стрічково-гвинтового змішувача сипких кормів на основі експериментальних досліджень процесу. В результаті лабораторних досліджень процесу змішування сипких кормів експериментальним змішувачем встановлено наступне. Зі збільшенням часу та частоти обертання однорідність суміші збільшується і набуває максимуму 97,8 % при  $n = 48 \text{ хв}^{-1}$  та  $t = 3,2 \text{ хв}$ . після чого спостерігається незначне зменшення. Характер процесу близький до типової кінетики змішування сипких матеріалів. Витрати енергії на процес мають нелінійний характер, при цьому оптимум (найменше значення) знаходиться в точці, яка відповідає значенню частоти обертання  $40,5 \text{ хв}^{-1}$ , а не в мінімумі  $n$ . При мінімумі  $k$  витрати енергії на процес складають 2,25 кВт/цикл а при максимумі – 3,66 кВт/цикл. Час змішування буде різний для різного вмісту найменшого компоненту і знаходиться в межах 2,9–3,56 хв. На основі отриманих даних встановлено раціональні параметри розроблюваного змішувача.

**корми, змішування, сипкі компоненти, експеримент, параметри, якість змішування, енергосміність, частота обертання, тривалість процесу**

**Постановка проблеми.** Відомо, що якість кормів має значний вплив на продуктивність сільськогосподарських тварин, і цей вплив становить приблизно 50–60 % [1]. У випадку свиней і птиці в Україні домінує сухий тип годівлі з використанням концентрованих кормів. Зауважимо, що більше 80 % птиці отримують повнораціонні комбікорми [2]. У галузі свинарства цей показник суттєво нижчий і становить близько 20–22 % [3]. Це можна пояснити тим фактом, що приблизно 60% всього поголів'я свиней в Україні зосереджено в господарствах населення та на невеликих фермах (з менш ніж 1000 голів), де годівлю тварин переважно проводять за допомогою концентрованих кормів у чистому вигляді, без приготування кормових сумішей. Однією з головних причин цієї ситуації є відсутність якісного обладнання для приготування кормових сумішей, зокрема, сипких кормів [4]. Ці змішувачі повинні бути надійними, легкими у використанні і забезпечувати необхідну якість у процесі приготування комбікормів, зокрема, високу однорідність процесу змішування [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Приготування кормових сумішей здійснюється в основному змішувачами різноманітної конструкції [6, 7]. Широке поширення отримали горизонтальні змішувачі з робочим органом у вигляді спіралі-стрічки, встановленої на валу, що обертається. Їх відрізняє здатність за досить короткий час роботи досягати необхідної рівномірності суміші [8, 9]. Тому вдосконалення конструкції стрічково-гвинтового змішувача є актуальним завданням. Основним призначенням пропонованого змішувача є приготування сухих сумішей із сипких кормових компонентів.

Використовуючи результати попередніх експериментальних досліджень [10, 11] проведемо визначення основних конструкційно технологічних параметрів стрічково-гвинтового змішувача сипких кормів.

З аналізу потреби в таких машинах [12] визначено, що необхідний об'єм бункера змішувача повинен бути в межах  $0,4\text{--}0,45\text{ м}^3$ . Теоретично встановлено, що в заданому об'ємі корму рівномірність змішування компонентів буде максимальною при зовнішньому діаметрі гвинта ( $0,76\text{--}0,84\text{ м}$ ) та її ширині –  $0,05\text{ м}$ . При цьому кут нахилу стрічки за умови найменшого опору при її обертанні повинен бути в межах  $50\text{--}80^\circ$ . Інтерпретуючи ці дані за умови одного повного витка гвинта отримаємо довжину бункера –  $1,5\text{ м}$ .

**Постановка завдання.** Метою роботи було обґрунтування режимних параметрів роботи стрічково-гвинтового змішувача сипких кормів на основі експериментальних досліджень процесу.

**Виклад основного матеріалу.** Компонувальну схему розробленого змішувача приведено на рис. 1.

Було створено зменшену модель спірально-стрічкового змішувача з об'ємом бункера  $0,4\text{ м}^3$  у масштабі 1:4, як показано на рисунку 1. Привід вала змішувача здійснювався від електродвигуна постійного струму через черв'ячний редуктор, а живлення та регулювання обертів двигуна контролювалися за допомогою регульованого блока живлення.

У якості варіабельних факторів було вибрано наступні параметри: частота обертання  $n$  робочого органу змішувача (діапазон від 35 до  $55\text{ хв.}^{-1}$ ), час змішування  $t$  (від 1 до 5 хв.) та вміст мінімального компоненту суміші  $g$  (від 5% до 15%). Дослідження проводилися з використанням методу математичного планування багатофакторного експерименту.

Для визначення впливу конструктивно-технологічних параметрів змішувача на ефективність процесу використовувалася математична теорія планування експерименту, яка дозволяє побудувати математичні моделі процесів у вигляді рівнянь регресії другого порядку (поліномів).

Оптимізація проводилася з використанням таких критеріїв, як питома енергоємність процесу змішування  $q$  ( $\text{Вт}\cdot\text{год}/\text{кг}$ ) та вміст однорідності суміші  $\mu$  (%)

$$q = \frac{N}{Q}, \quad (1)$$

де  $N$  – потужність на привод змішувача,  $\text{Вт}$ ;  $Q$  – продуктивність змішувача,  $\text{кг}/\text{год}$ .

Продуктивність змішувача  $Q$  визначали виходячи з часу, затраченого на приготування однієї наважки, яка складала  $2,750\text{ кг}$ .

$$Q = \frac{M}{t}, \quad (2)$$

де  $M$  – вага отриманого продукту,  $\text{кг}$ ;  $t$  – час продуктивної роботи змішувача,  $\text{год}$ .

Частоту обертання вала змішувача змінювали шляхом зміни подачі струму при відповідній напрузі. Потужність приводу визначали виходячи з сили струму  $I$  та напруги  $U$ , яка подавалась на двигун:

$$N = 0,9 \cdot I \cdot U, \quad (3)$$

де  $I$  – сила струму на приводі змішувача  $A$ ;  $U$  – напруга приводу,  $V$ .

Значення однорідності змішування  $\mu$  розраховували наступним чином

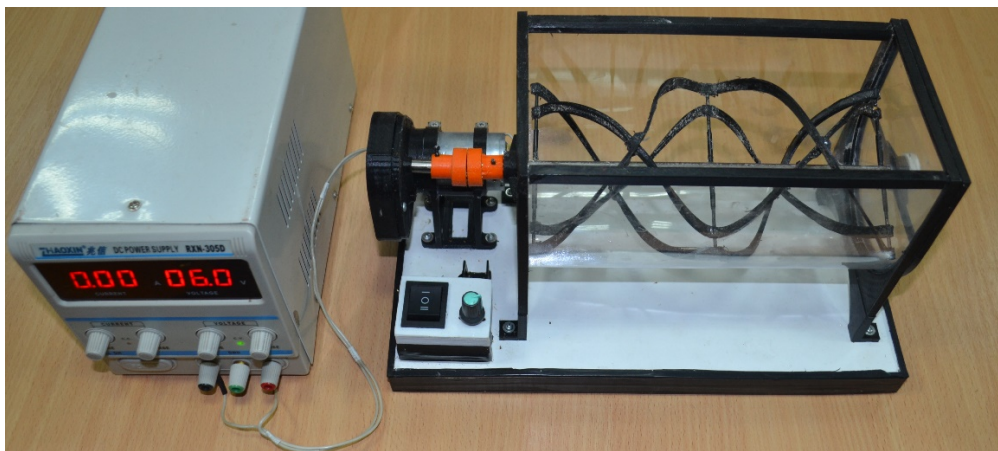
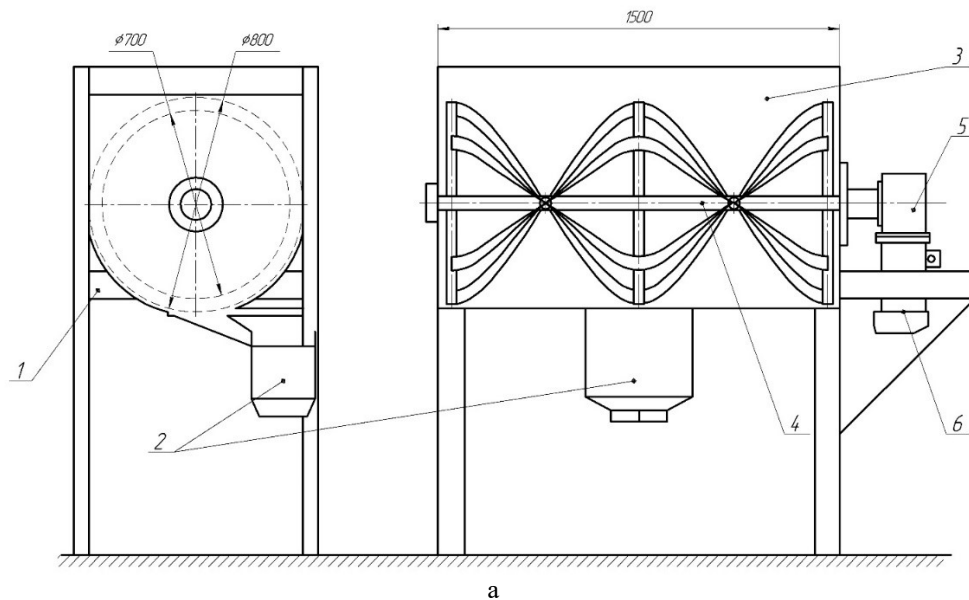
$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{B_0} \quad \text{при } B_i < B_0, \quad (4)$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{2B_o - B_i}{B_o} \text{ при } B_i > B_o, \quad (5)$$

де  $n$  – число проб;

$B_i$  – фактичний вміст меншого компонента суміші в  $i$ -ій пробі, кг;

$B_o$  – заданий вміст меншого компонента, кг.



1 – рама; 2 – розвантажувальна горловина; 3 – бункер; 4 – мішалка; 5 – редуктор; 6 – електродвигун

Рисунок 1 – Компонувальна схема (а) і загальний вигляд (б) розробленого змішувача  
Джерело: розроблено авторами

Заданий вміст меншого компонента  $B_o$  складав 5, 10 та 15 %. Фактичний вміст меншого компонента суміші в  $i$ -ій пробі визначали наступним чином:

$$B_i = \frac{m_i}{m_{пр}} \cdot 100, \quad (6)$$

де  $m_i$  – маса меншого компонента в пробі, кг;

$m_{пр}$  – маса проби, кг.

Маса однієї проби складала 2 % від загального завантаження змішувача, тобто  $0,55 \pm 10$  % кг. Для ідентифікації меншого компонента в пробі до змішувача завантажували пофарбоване у різні кольори зерно пшона (рис. 2).



Рисунок 2 – Зразки меншого компонента для введення до суміші

Джерело: розроблено авторами

Результати аналізу досліджень, які проводилися за допомогою методу математичного факторного планування експериментів, були оброблені за допомогою комп'ютерної програми Wolfram Cloud. Математична модель була розроблена для одного критерію оптимізації. Коефіцієнти регресії у математичних моделях були обчислені за відповідними формулами, які використовуються для D-оптимальних планів дослідів. На основі знайдених коефіцієнтів були створені рівняння регресії у кодованому вигляді.

Внаслідок проведених досліджень була побудована математична модель, яка вказує на вплив різних досліджуваних факторів на однорідність змішування. Отримана математична модель у розкодованому вигляді:

$$\mu = 64,04 + 1,04n - 0,01n^2 + 4,96t - 0,5t^2 + 0,033g - 0,021g^2 - 0,25nt, \quad (7)$$

де  $\mu$  – однорідність змішування, %;

$n$  – частота обертання валу мішалки,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$t$  – час змішування, хв.;

$g$  – вміст мінімального компоненту, %.

На рисунку 3 наведено графічне зображення взаємодій між різними факторами, що були досліджені, на однорідність змішування при зафіксованих оптимальних значеннях.

Залежність, представлена на рис. 3 свідчить про те, що зі збільшенням часу та частоти обертання однорідність суміші збільшується і набуває максимуму 97,8 % при  $n=48 \text{ хв}^{-1}$  та  $t=3,2$  хв. після чого спостерігається незначне зменшення. При цьому більш інтенсивний вплив здійснює час змішування. Вміст мінімального компоненту (рис. 3) не здійснює такого впливу і має лінійну залежність. Зважаючи на те, що час змішування та частота обертання робочого органу характеризують інтенсивність процесу змішування, можна стверджувати, що отримані результати цілком відповідають існуючій теорії змішування сипких кормів, коли по досягненню максимуму однорідності відбувається розшарування компонентів суміші, а, отже, зменшення її однорідності.

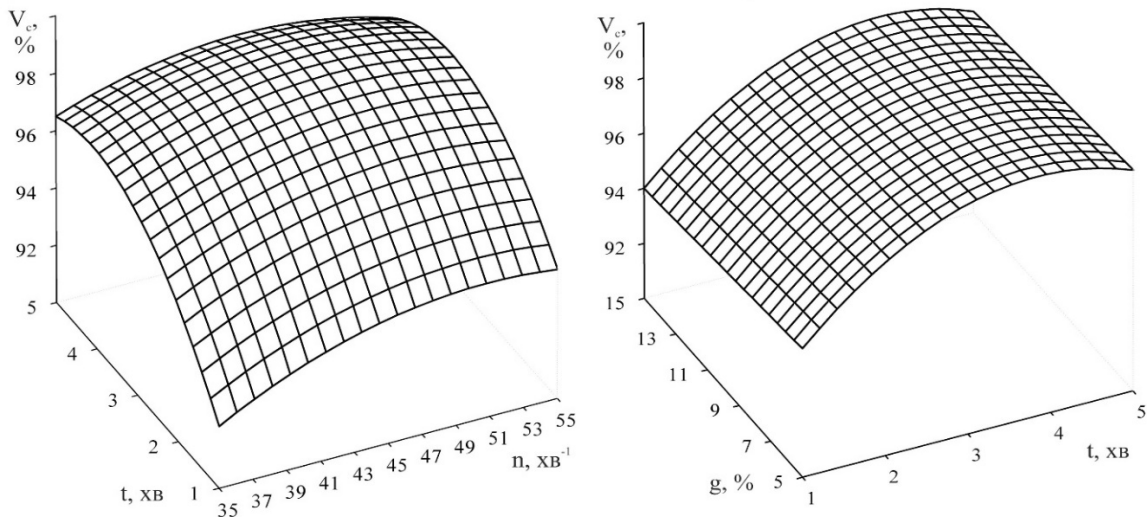


Рисунок 3 – Залежність однорідності змішування від часу змішування, частоти обертання робочого органу та вмісту мінімального компонента

*Джерело: розроблено авторами*

Оскільки на практиці найменш об'ємний компонент зазвичай є добавкою промислового виробництва (наприклад, преміксом, БМВД і т. д.), це викликає цікавість щодо дослідження впливу режиму роботи змішувача на однорідність суміші при різних концентраціях цього компонента. Тому, враховуючи отримані під час експерименту дані, ми побудували залежність (рис. 4) за допомогою складного показника  $k$ , який в кінцевому підсумку визначає кількість переміщень компонентів суміші.

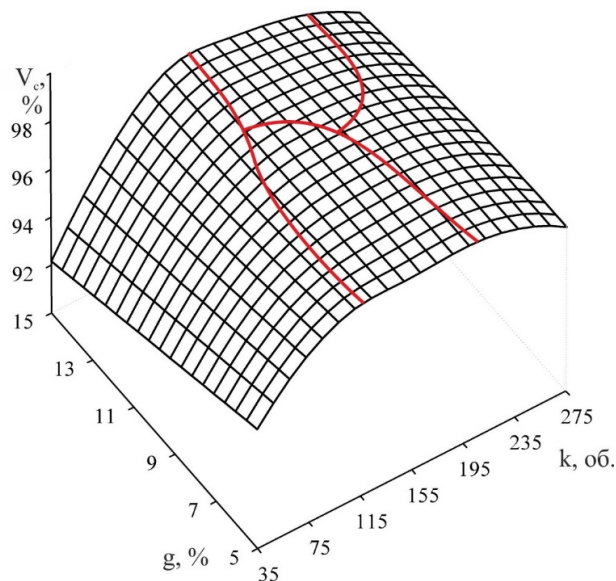


Рисунок 4 – Залежність однорідності змішування від режимного показника при різному вмісті мінімального компонента

*Джерело: розроблено авторами*

Як можна спостерігати на рисунку 4, характер процесу подібний до типової кінетики змішування сипких матеріалів. Спочатку відбувається інтенсивне перемішування (конвекція), після чого приріст однорідності зменшується, але

залишається на високому рівні (дифузія), а потім відбувається подальше зменшення однорідності (сегрегація).

При вмісті  $g = 5\%$ , максимальний рівень однорідності спостерігається при значеннях  $k = 121$  та  $k = 202$  обертів, і між ними виділяється виразна область сегрегації. Зі збільшенням вмісту мінімального компонента ця область зменшується і при досягненні значення  $10,5\%$  вмісту мінімального компонента вона зміщується в часі. Отже, зі збільшенням вмісту мінімального компонента необхідно збільшувати кількість переміщень компонентів суміші. Для експериментального змішувача оптимальні значення комплексного показника  $k$  знаходяться в діапазоні від 120 до 170 обертів.

Таким чином керування процесом змішування можна здійснювати змінюючи час змішування при сталих обертах робочого органу, при цьому для різного вмісту найменшого компоненту він буде різний.

За результатами досліджень було отримано математичну модель впливу досліджуваних факторів на потужність на привід змішувача. Отримана математична модель мала вигляд:

$$N = 2,1455n^2 - 156,75n + 3551,7. \quad (8)$$

Згідно отриманих даних мінімальна потужність буде при мінімальній частоті обертання, але нам треба також враховувати, що зі зменшенням частоти обертання буде збільшуватись час змішування, що обумовлено якісними показниками процесу. Тому нами побудовано залежності витрат енергії на цикл змішування.

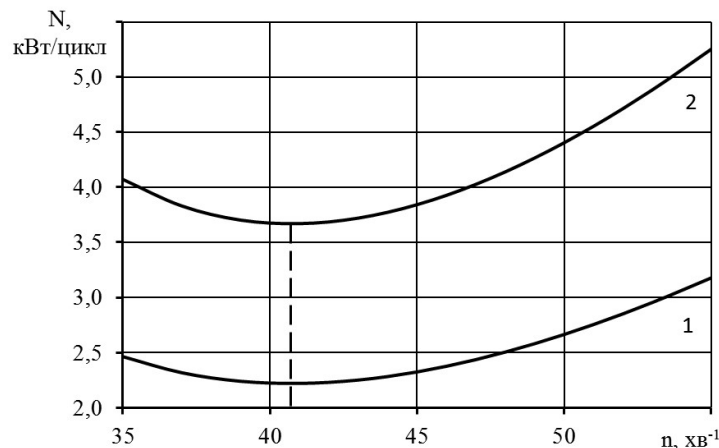
Було враховано значення показника  $k$ , при якому досягається максимум однорідності, в результаті чого було отримано наступну залежність:

$$N = \frac{k_{\min}^{\max}}{1000n_{\min}} \cdot N = \frac{k_{\min}^{\max}}{1000n_{\min}} \cdot (2,1455n^2 - 156,75n + 3551,7), \quad (9)$$

де  $n$  – поточна частота обертання,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$n_{\min}$  – мінімальна частота обертання згідно експерименту,  $\text{хв}^{-1}$ .

Графічну інтерпретацію рівняння за (9) представлено на рис. 5.



1 – мінімальна інтенсивність –  $k = \min$ ; 2 – мінімальна інтенсивність –  $k = \max$

Рисунок 5 – Залежність питомої енергоємності від частоти обертання робочого органу змішувача

Джерело: розроблено авторами

З представленої залежності чітко видно, що витрати енергії на процес мають нелінійний характер, при цьому оптимум (найменше значення) знаходиться в точці, яка відповідає значенню частоти обертання  $40,5 \text{ хв}^{-1}$ , а не в мінімумі  $n$ . Це пояснюється



тим, що зі зменшенням частоти обертання збільшується час змішування і приріст витрат енергії не компенсує цього зменшення.

По проходженні точки мінімуму спостерігаємо суттєвий ріст питомої енергоємності. В цілому при мінімумі  $k$  витрати енергії на процес складають 2,25 кВт/цикл а при максимумі – 3,66 кВт/цикл.

На наступному етапі вважаємо за доцільне для визначеної частоти обертання встановити значення часу змішування. Користуючись математичною моделлю однорідності суміші (7) та враховуючи, що оптимальна частота обертання з точки зору енергетичних витрат буде рівна  $40,5 \text{ хв}^{-1}$ , побудуємо залежність, за допомогою якої можна визначати час змішування для різних варіацій вмісту найменшого компоненту (9).

Як видно з рис. 6, залежність часу змішування від вмісту мінімального компоненту нелінійна. Це можна пояснити тим, що крім типових процесів (конвекція, дифузія, сегрегація) протікають і інші. Наприклад зі збільшенням вмісту  $g$  від 8 до 11 % час змішування збільшується більш стрімко, ніж на інших ділянках.

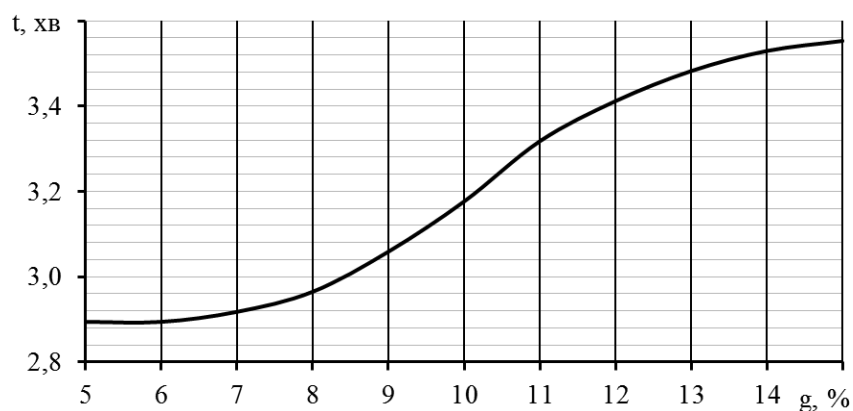


Рисунок 6 – Діаграма для вибору часу змішування при різному вмісті мінімального компоненту  
Джерело: розроблено авторами

Це можна пояснити тим, що в зазначеному діапазоні  $g$  конвекційне змішування протікає повільніше а дифузійне ще не впливає так інтенсивно. З подальшим збільшенням  $g$  швидкість зазначених процесів вирівнюється тому час змінюється не так суттєво.

Використовуючи отримані під час експериментальних досліджень результати проведемо визначення основних конструкційно-технологічних параметрів стрічково-гвинтового змішувача сипких кормів.

З аналізу потреби в таких машинах визначено, що необхідний об'єм бункера змішувача повинен бути в межах  $0,4\text{--}0,45 \text{ м}^3$ . Теоретично встановлено, що в заданому об'ємі корму рівномірність змішування компонентів буде максимальною при зовнішньому діаметрі гвинта ( $0,76\text{--}0,84 \text{ м}$ ) та її ширині –  $0,05 \text{ м}$ . При цьому кут нахилу стрічки за умови найменшого опору при її обертанні повинен бути в межах  $50\text{--}80^\circ$ . Інтерпретуючи ці дані за умови одного повного витка гвинта отримаємо довжину бункера –  $1,5 \text{ м}$ .

З експериментальних досліджень макетного зразка, виконаного у масштабі 1:4, встановлено, що частота обертання валу мішалки змішувача повинна складати  $40\text{--}41 \text{ хв}^{-1}$ . При цьому час змішування буде різний для різного вмісту найменшого компоненту і знаходиться в межах  $2,9\text{--}3,56 \text{ хв}$ .

**Висновки.** В результаті лабораторних досліджень процесу змішування сипких кормів експериментальним змішувачем встановлено наступне:

– зі збільшенням часу та частоти обертання однорідність суміші збільшується і набуває максимуму 97,8 % при  $n = 48 \text{ хв}^{-1}$  та  $t = 3,2 \text{ хв}$ . після чого спостерігається незначне зменшення;

– характер процесу близький до типової кінетики змішування сипких матеріалів;

– витрати енергії на процес мають нелінійний характер, при цьому оптимум (найменше значення) знаходиться в точці, яка відповідає значенню частоти обертання  $40,5 \text{ хв}^{-1}$ , а не в мінімумі  $n$ . При мінімумі  $k$  витрати енергії на процес складають  $2,25 \text{ кВт/цикл}$  а при максимумі –  $3,66 \text{ кВт/цикл}$ ;

– час змішування буде різний для різного вмісту найменшого компоненту і знаходиться в межах  $2,9\text{--}3,56 \text{ хв}$ .;

– на основі отриманих даних встановлено раціональні параметри розроблюваного змішувача.

## Список літератури

1. Ібатулін І.І., Мельничук Д.О., Богданов Г.О. Годівля сільськогосподарських тварин: підручник. Вінниця: Нова книга, 2007. 612 с.
2. Бомко В.С., Сиваченко Є.В., Сметаніна О.В. Корми і кормові добавки та ефективність їх використання в годівлі тварин: навч. посібник. Біла Церква, 2023. 225 с. URL: [https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/8420/1/Korm\\_dobavky.pdf](https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/8420/1/Korm_dobavky.pdf) (дата звернення: 15.08.2023)
3. Бегма Н.А. Використання кормів: навч. посіб. Дніпро: ДДАЕУ, 2018. 168 с. URL: <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/1362> (дата звернення: 16.08.2023)
4. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / Е. Б. Алієв та ін. ; за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛІРА, 2022. 192 с. URL: [http://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga\\_6.pdf](http://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_6.pdf) (дата звернення: 15.08.2023)
5. Алієв Е.Б., Пацула О.М., Гриценко В. Т. Технологія комплексної безвідходної 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 : СТАТУС. 2017. URL: [http://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga\\_2.pdf](http://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_2.pdf) (дата звернення: 19.08.2023)
6. Shevchenko I., Aliiev E. Improving the efficiency of the process of continuous flow mixing of bulk components. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 6/1 (108). Pp. 6–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216409
7. Liao C.S., Hsiaub S.S., Nien H.C. Effects of density ratio, rotation speed, and fill level on density-induced granular streak segregation in a rotating drum. *Powder Technol.* 2015. 284. Pp. 514–520. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.07.030.
8. Бакалов В.Г., Чередніченко П.І., Бакалов О.В. Змішувачі для сипких матеріалів і методи оцінювання якості суміші: монографія. Чернігів: ЧДТУ, 2013. 159 с. URL: [http://ir.stu.cn.ua/bitstream/handle/123456789/9028/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F\\_%D0%91%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2\\_%D1%81%D0%BC%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5\\_2013.pdf](http://ir.stu.cn.ua/bitstream/handle/123456789/9028/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F_%D0%91%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2_%D1%81%D0%BC%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_2013.pdf) (дата звернення: 21.08.2023)
9. Машини та обладнання для тваринництва: підручник / І.І.Евенко та ін. К.: ЦП «Компринт», 2018. 567 с.
10. Авраменко В.В. Обґрунтування параметрів спірального дозатора сипких кормів. Пояснювальна записка до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр». Керівник: Дудін В. Ю. ДДАЕУ, 2021. 102 с. URL: <https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/3831/1/%D0%90%D0%B2%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%92.%D0%92..pdf> (дата звернення: 19.08.2023)
11. Дудін В.Ю., Корнієнко А.А. Експериментальні дослідження процесу змішування сипких кормів. *Kluczowe aspekty naukowej działalności – 2016 : Materiały XII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji*, Vol. 8. Matematyka. Fizyka. Budownictwo i architektura. Rolnictwo. Techniczne nauki (7–15 stycznia 2016 roku). Przemysł. Nauka i studia, 2016. С. 30–32.



12. Кісілюв Р.В., Матвєєв К.Д., Лузан П.Г. Дослідження технологічної ефективності змішування кормів двоступеневим однофазним комбінованим змішувачем періодичної дії. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2013. Вип. 43 (II)ю. С. 108–112.

## Referencis

1. Ibatullin, I.I., Melnychuk, D.O. & Bohdanov, H.O. (2007). *Hodivlia silskohospodarskykh tvaryn: pidruchnyk [Feeding of farm animals: a textbook]*. Vinnytsia: Nova knyha [in Ukrainian].
2. Bomko, V.S., Syvachenko, Ye.V., Smetanina, O.V. (2023). *Kormy i kormovi dobavky ta efektyvnist yikh vykorystannia v hodivli tvaryn: navch. Posibnyk [Fodder and feed additives and the effectiveness of their use in animal feeding: training. manual]*. Bila Tserkva. Retrieved from [https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/8420/1/Korm\\_dobavky.pdf](https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/8420/1/Korm_dobavky.pdf) [in Ukrainian].
3. Behma, N. A. (2018). *Vykorystannia kormiv: navchalnyi posibnyk [The use of fodder: a study guide]*. Dnipro: DDAEU. Retrieved from <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/1362> [in Ukrainian].
4. Aliiev, E. B., Mykolenko, S. Yu., Sova, N. A. et al. (2022). *Tekhniko-tehnolohichne zabezpechennia bezvidkhodnoi pererobky zernovoi syrovyny u kharchovi produkty i kormy: kolektyvna monohrafiia [Technical and technological support for waste-free processing of grain raw materials into food products and fodder: collective monograph] / za zah. red. E. B. Aliieva*. Dnipro: LIRA. Retrieved from [http://aliiev.in.ua/doc/knigi/kniga\\_6.pdf](http://aliiev.in.ua/doc/knigi/kniga_6.pdf) [in Ukrainian].
5. Aliiev, E.B., Patsula, O.M. & Hrytsenko, V.T. (2017). *Tekhnolohiia kompleksnoi bezvidkhidnoi pererobky makukhy z nasinnia oliinykh kultur z oderzhanniam vysokoiakisnykh povnotsinykh proteinovykh dobavok u vyhliadi pelet ta tverdoho biopalyva [Technology of complex waste-free processing of cake from oilseeds to obtain high-quality complete protein supplements in the form of pellets and solid biofuel]: Naukovo-metodychni rekomendatsii*. Instytut oliinykh kultur Natsionalnoi akademii ahrarykh nauk Ukrainy. Elektronnyi analoh drukovanoho vydannia (elektronna knyha). Zaporizhzhia : STATUS. Retrieved from [http://aliiev.in.ua/doc/knigi/kniga\\_2.pdf](http://aliiev.in.ua/doc/knigi/kniga_2.pdf) [in Ukrainian].
6. Shevchenko, I. & Aliiev, E. (2020). Improving the efficiency of the process of continuous flow mixing of bulk components. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 6/1 (108), 6–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216409
7. Liao, C. C., Hsiaub, S. S. & Nien, H. C. (2015). Effects of density ratio, rotation speed, and fill level on density-induced granular streak segregation in a rotating drum. *Powder Technol*, 284, 514–520. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.07.030.
8. Bakalov, V.H., Cherednichenko, P.I. & Bakalov O.V. (2013). *Zmishuvachi dlia syppykh materialiv i metody otsiniuvannia yakosti sumishi: monohrafiia [Mixers for loose materials and methods of evaluating the quality of the mixture: a monograph]*. Chernihiv: ChDTU. Retrieved from [http://ir.stu.cn.ua/bitstream/handle/123456789/9028/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F\\_%D0%91%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2\\_%D1%81%D0%BC%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5\\_2013.pdf](http://ir.stu.cn.ua/bitstream/handle/123456789/9028/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F_%D0%91%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2_%D1%81%D0%BC%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_2013.pdf) [in Ukrainian].
9. Revenko, I. I., Brahinets, M. V., Khmelovskiy, V. S., Rebenko, V. I., Zabolotko O. O., Potapova, S. Ye., Achkevych, O. M. & Radchuk V. V. (2018). *Mashyny ta obladnannia dlia tvarynystva: Pidruchnyk [Machinery and equipment for animal husbandry: Textbook]*. K.: TsP «Komprint» [in Ukrainian].
10. Avramenko, V.V. (2021). *Obgruntuvannia parametriv spiralnogo dozatora syppykh kormiv [Justification of the parameters of the spiral bulk feed dispenser]*. Poiasniuvanna zapyska do dyplomnoi roboty osvithnoho stupenia «Mahistr». Kerivnyk: Dudin V. Yu. DDAEU. Retrieved from <https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/3831/1/%D0%90%D0%B2%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%92.%D0%92..pdf> [in Ukrainian].
11. Dudin, V. Yu. & Korniienko, A. A. (2016). Eksperymentalni doslidzhennia protsesu zmishuvannia syppykh kormiv [Experimental studies of the process of mixing loose fodder]. *Materiały XII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Kluczowe aspekty naukowej działalności – 2016» Volume 8. Matematyka. Fizyka. Budownictwo i architektura. Rolnictwo. Techniczne nauki (7–15 stycznia 2016 roku)*. Przemysł. Nauka i studia: 30–32. [in Ukrainian].
12. Kisilov, R. V., Matvieiev, K. D., Luzan, P. H. (2013). *Doslidzhennia tekhnolohichnoi efektyvnosti zmishuvannia kormiv dvostupenevym odnovalnym kombinovanim zmishuvachem periodychnoi dii [Study of the technological efficiency of feed mixing with a two-stage single-phase combined mixer of periodic action]*. Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, *Issue 43 (II)*, 108–112. [in Ukrainian].

**Volodymyr Dudin**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Govorukha**, Prof., DSc.  
*Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine*

### **Justification of the Structural and Technological Parameters of the Belt-screw Mixer of Loose Fodder**

The purpose of the work was to substantiate the operational parameters of the belt-screw mixer of bulk feed on the basis of experimental studies of the process.

As a result of experimental studies of the process of mixing loose feed with an experimental mixer, the following was established. With increasing time and rotation frequency, the homogeneity of the mixture increases and reaches a maximum of 97.8% at  $n = 48 \text{ min}^{-1}$  and  $t = 3.2 \text{ min}$ . after which there is a slight decrease. The nature of the process is close to the typical kinetics of mixing loose materials. The energy consumption for the process is non-linear in nature, while the optimum (the smallest value) is located at the point corresponding to the value of the rotation frequency of  $40.5 \text{ min}^{-1}$ , and not at the minimum  $n$ . At minimum  $k$ , energy consumption for the process is  $2.25 \text{ kW/cycle}$ , and at maximum –  $3.66 \text{ kW/cycle}$ . The mixing time will be different for different contents of the smallest component and is within  $2.9\text{--}3.56 \text{ min}$ .

Based on the obtained data, the rational parameters of the mixer under development were established.  
**feed, mixing, loose components, experiment, parameters, quality of mixing, energy consumption, rotation frequency, duration of the process**

*Одержано (Received) 18.09.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 04.10.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023*

**УДК 631.363:636.087**

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.121-130>

**Е. Б. Алієв**, ст.досл., проф., д-р техн. наук, **В. Ю. Дудін**, доц., канд. техн. наук,  
**М. О. Лінко**, асп.

*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна*  
*e-mail: aliev@meta.ua*

## **Результати експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів**

Застосування експандерів є необхідним у виробництві кормів і харчових продуктів, оскільки ці технічні засоби дозволяють покращити якість і поживні характеристики кінцевого продукту. Завдяки їх високій продуктивності і можливості регулювання тиску, експандери забезпечують ефективну обробку матеріалів, зберігаючи при цьому їх корисні властивості. Отже, оптимізація технологічних параметрів для формування експандатів залишається актуальною задачею в інжинірингу експандерів. Метою досліджень є обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів малогабаритного експандера кормів експериментальним шляхом. В результаті експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів встановлені залежності зміни продуктивності експандера  $Q$ , його споживаної потужності  $N$ , питомої енергоємності процесу експандування  $q$  і щільності отриманих експандатів  $\rho$  від вологості комбікорму  $W$ , зазору між конусом та гайкою  $\delta_c$ , частоти обертання гвинта  $n$ . Знайшовши в програмному пакеті Wolfram Cloud значення факторів досліджень при якому спостерігається мінімальне значення питомої енергоємності процесу експандування  $q = 30,7 \text{ кВт-год/т}$  встановлено, що  $W = 27,1 \%$ ,  $\delta_c = 3,7 \text{ мм}$ ,  $n = 54,4 \text{ об/хв}$ . При цьому продуктивність складала  $Q = 28,8 \text{ кг/год}$ , споживана потужність  $N = 879 \text{ Вт}$ , а щільність експандатів  $\rho = 336 \text{ кг/м}^3$ .

**корма, експандер, експеримент, параметри, продуктивність, енергоємність, вологість, частота обертання, зазор, конус**

© Е.Б. Алієв, В.Ю. Дудін, М. О. Лінко, 2023