

MODELLING OF MIXING COMPONENTS BY SCREW CONVEYOR-MIXERS

R. Rohatynskiy, I. Gevko, D. Dmutriv, V. Hud, O. Dmutriv

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine



Key words:

mixer,
key component,
volume concentration,
indicator,
binomial distribution

Article history:

Received 10.09.2020

Accepted 12.10.2020

Corresponding author:

vic_g @ukr.net

ABSTRACT

Mixing of bulk materials is widely used in different industries, including agricultural production. The efficiency of the method of discrete elements as a tool for studying technological processes with bulk load is substantiated, which is a good tool for studying mixers in the mode of a calculated experiment, but does not link the parameters and modes of operation of the mixer with the criteria of mixing quality. The estimation of the smoothing ability of the screw conveyor-mixers when using the method of impulse disturbance is carried out, and the results of modeling the smoothing ability of the screw conveyor-mixer are given. It has been established that the distribution of the volumetric concentration of the indicator (key component) along the length of the conveyor operates as a continuous mixer, is determined by the coefficient of load transfer between adjacent loops and corresponds to the law of binomial distribution. It has been found that with an increase in the length of the screw mixer-conveyor and its flexibility, the number of mixing cells increases and the mixing capacity of the conveyor increases. It is shown that the highest smoothing capacity is possessed by screw mixing conveyors with a load transfer coefficient equal to 0.5, in which the excess concentration of the key component is reduced by 8 times. It has been proven that it is possible to achieve such a miniature overfilling of the mixture in a screw mixing conveyor by a combination of factors such as the gap between the screw belt and the casing (its maximum increase), the filling factor of the conveyor (rational should be maintained at 0.5), the rotation speed of the working body transition from low-speed transportation mode to unstable mode (mixing mode), as well as making certain holes along the periphery of the screw.

УДК 631.26

**МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ
ГВИНТОВИМИ КОНВЕЄРАМИ-ЗМІШУВАЧАМИ****Р.М. Рогатинський, Ів.Б. Гевко, Д.В. Дмитрів,
В.З. Гудь, О.Р. Дмитрів**Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя, Тернопіль, Україна**Ключові слова:**змішувач,
ключовий компонент,
об'ємна концентрація,
індикатор,
біноміальний розподіл**Історія публікації:**

Отримано 10.09.2020

Затверджено 12.10.2020

Автор для**листування:**

vic_g @ukr.net

АНОТАЦІЯ

Обґрунтовано ефективність методу дискретних елементів, як інструменту дослідження технологічних процесів із сипким матеріалом. Цей метод є хорошим інструментом для дослідження змішувачів у режимі обчислюваного експерименту, проте не пов'язує параметри і режими роботи змішувача із критеріями якості змішування. Проведено моделювання та оцінку згладжуючої здатності гвинтових конвеєрів-змішувачів із застосуванням методу імпульсного збурення. Встановлено, що розподіл об'ємної концентрації ключового компонента за довжиною конвеєра характеризується коефіцієнтом пересипання матеріалу між сусідніми витками гвинта та відповідає закону біноміального розподілу. Встановлено, що із збільшенням довжини конвеєра-змішувача та кількості заходів гвинта зростатиме кількість комірок змішування та зростатиме змішувальна здатність конвеєра. Показано, що найвищу згладжувальну здатність мають гвинтові конвеєри-змішувачі із коефіцієнтом пересипання матеріалу 0,5, в яких надлишкова концентрація ключового компонента зменшується у 8 разів. Досліджено, що досягнути такого пересипання суміші в гвинтовому конвеєрі-змішувачі можна поєднанням таких факторів, як зазором між гвинтовою стрічкою та кожухом, коефіцієнтом заповнення конвеєра, швидкістю обертання робочого органа та переходом із тихохідного режиму транспортування в нестійкий режим, а також виконанням отворів по периферії гвинта.

<https://doi.org/10.36910/acm.vi45.381>

Стан питання та постановка проблеми

Змішування сипких матеріалів широко використовується у різних галузях виробництва, зокрема в агровиробництві. Як показує світовий досвід, одним із прогресивних заходів економії витрат на приготування та роздавання кормів є заміна кормоцехів із кормороздавачами на кормороздавач-змішувач, який забезпечує функції подрібнення компонентів та їх змішування, транспортування і розподілення в годівниці тваринам [1, 2]. Крім того, перспективними для використання є гвинтові (шнекові) змішувачі, які порівняно із різноманітними конструктивними рішеннями змішувачів неперервної дії мають просту технологічну схему, високу продуктивність та можуть бути використані в процесах із змінними режимами роботи. Важливими перевагами гвинтових змішувачів також є проста конструкція, низька металоємність, герметичність, надійність та автоматизація процесів керування. Однією із важливих їх переваг є здатність не тільки забезпечувати об'ємне змішування компонентів, але і згладжувати зміни в концентрації компонентів внаслідок нерівномірного їх завантаження.

Зокрема, для змішування сипких матеріалів (компонентів) широко використовуються змішувачі на базі тихохідних гвинтових конвеєрів, які на практиці застосовуються в різних технологічних процесах для поєднання операцій транспортування і змішування. Проте, інтенсивність процесу змішування типовими гвинтовими конвеєрами-змішувачами (ГКЗ) та їх здатність вирівнювати концентрацію компонентів в часі є незначними. Покращення зазначених якісних характеристик досягається вдосконаленням конструкцій гвинтових конвеєрів-змішувачів, вибором оптимальних режимів їх роботи, що забезпечується, зокрема, розробкою їх адекватних математичних моделей.

Мета дослідження – розробити модель процесу неперервного змішування сипких компонентів гвинтовими конвеєрами та методологію критеріальної оцінки якості змішування протягом часу роботи змішувача, а також перспективні конструкції гвинтових конвеєрів-змішувачів, що забезпечують якісне об'ємне змішування компонентів та згладжування в часі нерівномірності подачі компонентів у зону змішування.

Матеріали і методи

Для підвищення інтенсивності змішування сипких компонентів гвинтовий робочий орган виконують лопатево-секційним, гофрованим, із вікнами тощо [1, 3]. Проте, недоліками таких ГКЗ є низька

продуктивності, значна енергоємність та нестабільність процесів транспортування і змішування, труднощі в розробці моделей.

Процес моделювання змішування сипких матеріалів може здійснюватися за допомогою різних підходів та методів, зокрема, емпіричних, статистичних, аналізу структури потоків матеріалу за допомогою функції розподілення часу перебування частинок матеріалу всередині змішувача, механіки суцільних середовищ та ентропійно-інформаційного [4, 5]. Найбільш розповсюдженими є такі математичні моделі дослідження змішування: коміркові, ідеального витиснення та ідеального змішування, дифузійна та комбінована [5].

Одним із найбільш ефективних інструментів дослідження технологічних процесів із сипким матеріалом є метод дискретних елементів [6, 7]. Для випадку моделювання процесів потокового змішування метод розкрито в науковій праці [8]. Проте, для реалізації такого методу потрібне відповідне дороговартісне програмне забезпечення. Крім цього, метод дискретних елементів є хорошим інструментом для дослідження змішувачів у режимі обчислюваного експерименту, проте не пов'язує безпосередньо параметри і режими роботи змішувача із критеріями якості змішування.

Результати дослідження та обговорення

З метою вибору раціональної схеми ГКЗ розглянемо процес переміщення ними суміші. Об'ємна продуктивність ГКЗ за усталеного режиму роботи визначається так, як для тихохідних конвеєрів [9]:

$$Q = \varphi_T \psi_T S_k v_z = \frac{\varphi_T \psi_T \omega T (D^2 - d^2)}{8}, \quad (1)$$

де φ_T – коефіцієнт заповнення ГКЗ; ψ_T – коефіцієнт, що ураховує пересипання суміші через вал шнека та зазори; S_k – площа поперечного “живого” перерізу кожуха ГКЗ, м²; v_z – ідеальна (максимальна) осьова швидкість суміші в ГКЗ, м/с; ω – кутова швидкість обертання гвинта, рад./с; D , d та T – відповідно, зовнішній і внутрішній діаметри та крок гвинтової стрічки, м.

До виконання технологічного процесу змішування висуваються, перш за все, вимоги щодо якості змішування. Якість змішування компонентів суміші оцінюється за вмістом ключового компонента, який має бути рівномірно розподілений за об'ємом суміші, причому його концентрація не має змінюватись з часом. При цьому суміш умовно розглядають як двохкомпонентну, яка містить ключовий та умовний компоненти, причому під останнім розуміють усі інші компоненти [10]. Серед інтегральних критеріїв оцінки роботи змішувачів сипких матеріалів можна виокремити коефіцієнт

неоднорідності концентрації ключового компонента. Проте, він не дає відповіді на закономірності зміни концентрації компонентів з часом, тобто ним неможливо оцінити згладжуючу здатність змішувача. Дослідження якісних характеристик процесу змішування та встановлення його згладжуючої здатності, як правило, базується на встановленні реакції моделі на стандартне збурення, яке описується як імпульс за допомогою дельта-функції Дірака $\delta(t)$.

Для оцінки згладжуючої здатності ГКЗ використовуємо метод імпульсного збурення, який полягає у миттєвому введенні ключового компонента у вигляді індикатора на вхід ГКЗ та встановленні закону зміни концентрації індикатора на виході ГКЗ з часом [9, 10]. Розглянемо змішувач із суцільним гвинтовим робочим органом. Розіб'ємо зону змішування ГКЗ за його довжиною на n_k комірок, які в системі координат змішувача обмежуються нижніми поверхніми гвинта в початковий момент часу t_0 . Тобто кількість комірок відповідає кількості проміжків довжиною $\Delta T = T/k_T$ між сусідніми витками (де k_T – кількість заходів шнека). Позначимо об'єм введеного індикатора g_i . Оскільки об'єм комірки становить $V_k = 0,25\pi\Delta T(D^2 - d^2)$, то початкова (середня у нульовій комірці) об'ємна концентрація індикатора після його введення становить:

$$C_0 = \frac{4g_i}{\pi\varphi_T\Delta T(D^2 - d^2)}. \quad (2)$$

Відокремлений (розміщений між сусідніми витками) об'єм суміші із частиною індикатора, без урахування пересипання, проходить одну комірку за час:

$$t_\Delta = \frac{\Delta T}{v_z} = \frac{2\pi}{k_T\omega}. \quad (3)$$

Нехай, величина t_Δ , за яку вал обернеться на $1/k$ обертів за безрозмірний проміжок (імпульс) часу n_t , рівна одиниці. За цей час гвинтовий робочий орган перемістить вантаж із попередньої комірки $n_k = i - 1$ в наступну, тобто $n_k = i$. Часові проміжки довжиною t_Δ відобразимо рядом $n_t = \{0; 1; 2; \dots; j\}$. Тоді кількість індикатора в i -ій комірці за j -ий проміжок часу позначимо K_{ij} . Нехай, в початковий момент часу ($n_t = 0$) увесь індикатор подається в нульову комірку ($n_k = 0$), де його початкова відносна концентрація рівна $C_0(t_\Delta) = 1$. Для ГКЗ ймовірність того, що за j -ий проміжок часу частина індикатора захопиться гвинтовою стрічкою і переміститься в наступну i -ту комірку, становить p_{ij} , а ймовірність того, що частина індикатора залишиться в попередній комірці становить $q_{ij} = 1 - p_{ij}$. За наступний проміжок часу частина $p_{i(j+1)}$ індикатора, що залишився в попередній

комірці, знову переміститься в наступну, а в ній залишиться частина $q_{i(j+1)} = 1 - p_{i(j+1)}$ від залишкового вмісту індикатора в цій комірці. До комірки n_k індикатор може переміститися не швидше, ніж через $n_t = n_k$ проміжків, що узгоджується із максимальною швидкістю v_z руху суміші. Нехай, у початковий момент часу в нульову комірку завантажуються одинична кількість індикатора $K_{00} = 1$. Тоді через кожен наступний одиничний проміжок часу Δn_t частина індикатора переміщатиметься в наступну комірку, згідно заданої ймовірності p_{ij} , а частина залишатиметься (таблиця).

Таблиця – Розподіл індикатора за комірками n_{ki} під час руху вантажу протягом часу $t = n_t \Delta$

n_{ki}	n_{ij}					$n_t = n_k$
	0	1	2	3	...	
0	$K_{00} = 1$	$K_{01} = K_{00}q_{01}$	$K_{02} = K_{01}q_{02}$	$K_{03} = K_{02}q_{03}$...	$K_{0k} = K_{0(k-1)}q_{0k}$
1	$K_{10} = 0$	$K_{11} = K_{00}p_{01}$	$K_{12} = K_{01}p_{02} + K_{11}q_{12}$	$K_{13} = K_{02}p_{03} + K_{12}q_{13}$...	$K_{1k} = K_{0(k-1)}p_{0k} + K_{1(k-1)}q_{1k}$
2	$K_{20} = 0$	$K_{21} = 0$	$K_{22} = K_{11}p_{12}$	$K_{23} = K_{12}p_{13} + K_{22}q_{23}$...	$K_{2k} = K_{1(k-1)}p_{1k} + K_{2(k-1)}q_{2k}$
3	$K_{30} = 0$	$K_{31} = 0$	$K_{32} = 0$	$K_{33} = K_{22}p_{23}$...	$K_{3k} = K_{2(k-1)}p_{2k} + K_{3(k-1)}q_{3k}$
...
n_k	0	0	0	0	0	$K_{kk} = K_{(k-1)(k-1)} \times p_{(k-1)k}$

У таблиці представлено розподіл кількості індикатора за комірками (горизонтальні рядки) у кожен із моментів часу n_{ij} (вертикальні стовпці). У крайньому правому стовпці представлено розподіл індикатора за комірками (від 0 до n_k) за час, коли частина індикатора досягне крайньої комірки $n_t = n_k$, тобто опиниться на виході із змішувача. Для змішувачів на базі гвинтових конвеєрів ймовірність p_{ij} переміщення вантажу із комірки у комірку приймаємо постійною за довжиною змішування і рівною коефіцієнту p , який урахує пересипання суміші через зазори, а ймовірність того, що частина індикатора залишиться в попередній комірці, приймаємо рівною q .

Відповідно, розподіл індикатора за довжиною змішувача (за комірками) відповідає біноміальному розподілу:

$$\begin{aligned}
 K_{ij} &= C_j(n_t) = K_{i(j-1)}q + K_{(i-1)(j-1)}p = \\
 &= C_j^i p^i q^{j-i} = C_{n_t}^{n_k} \psi^{n_k} (1-\psi)^{n_t-n_k},
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

де $C_{n_i}^{n_k} = \frac{n_i!}{n_k!(n_i - n_k)!}$ – сполучення n_k елементів із множини n_i .

Нехай, гвинтовий конвеєр-змішувач довжиною L має $n_k = k_T L/T$ комірок. Тоді в момент часу $t_k = n_k t_{\Delta}$ індикатор з'являється на виході із концентрацією $C_e(t_{n_k}) = C_{n_k}^{n_k} \psi_T^{n_k}$.

У момент часу $t_{k+1} = (n_k + 1)t_{\Delta}$ безрозмірна концентрація на виході ГКЗ становитиме $C_e(t_{n_k+1}) = C_{n_k+1}^{n_k} \psi_T^{n_k} (1 - \psi_T)$, а в довільний момент часу $t_j = n_i t_{\Delta}$ безрозмірна концентрація буде $C_e(t_{n_i}) = C_{n_i}^{n_k} \psi_T^{n_k} (1 - \psi_T)^{n_i - n_k}$.

У розмірних одиницях концентрація індикатора на виході описується C -кривою, що характеризує згладжуючу здатність ГКЗ:

$$C_e(t_i) = C_0 C_e(t_p) = \frac{4g_i C_e(t_p)}{\pi \varphi_T \Delta T (D^2 - d^2)}. \quad (5)$$

Що менше максимальне значення похідної $d[C_e(t_i)]/dt$, то більша згладжуюча здатність ГКЗ. Аналіз залежностей (4) та (5) показує, що закон зміни концентрації $C_e(t_i)$ визначається вибором параметрів ψ_T , L та k_T .

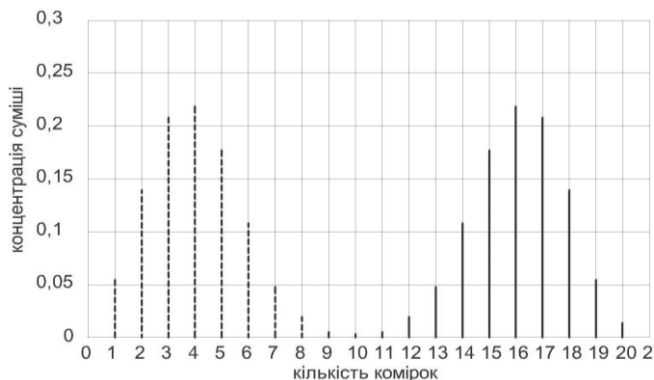
На графіку (рис. 1) представлено розподіл ключового компонента-індикатора у змішувачі, що має 20 комірок (n_k), для суцільного гвинтового конвеєра-змішувача з $\psi_T = 0,8$ (на рис. 1 – суцільна лінія) та лопатевого змішувача з $\psi_T = 0,2$ (на рис. 1 – пунктирна лінія) для випадку, коли $n_i = n_k$, що відповідає часу змішування $t = t_{\Delta} n_k = 2\pi L/(\omega T)$ (рис. 1, а), та для випадку часу проходження максимальної концентрації індикатора n_i (рис. 1, б).

Очевидно, що зі збільшенням довжини конвеєра та кількості заходів гвинта зростатиме кількість комірок змішування та зростатиме змішувальна здатність конвеєра. Проаналізуємо вплив коефіцієнта пересипання ψ_T . Аналіз рис. 1 показує, що максимальна концентрація ключового компонента зменшується в 5 разів (з 1 до 0,2) як у випадку $\psi_T = 0,8$, так і у випадку $\psi_T = 0,2$. Проте, у лопатевого змішувача швидкість переміщення суміші значно менша, ніж швидкість її переміщення у гвинтовому конвеєрі-змішувачі.

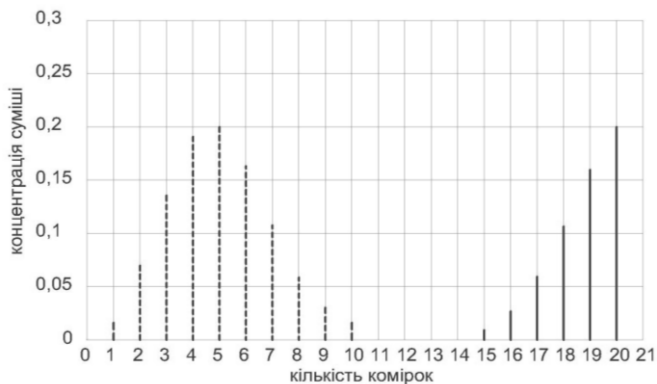
Із збільшенням коефіцієнта пересипання до $\psi_T = 0,5$, максимальну концентрацію можна знизити до 0,12 (рис. 2) для ГКЗ із 20-ма комірками. Цей випадок є оптимальним з точки зору забезпечення максимальної згладжувальної здатності гвинтового транспортера-кормозмішувача.

Досягнути пересипання суміші в ГКЗ між витками на рівні $\psi_T = 0,5$

можна збільшенням: зазору між гвинтовою стрічкою та кожухом, коефіцієнта заповнення конвесра, швидкості обертання робочого органа та переходом із тихохідного режиму транспортування в нестійкий режим (режим змішування), а також виконанням отворів по периферії гвинта. Як показав досвід експлуатації гвинтових змішувачів, найбільш ефективним є поєднання вказаних факторів.



а

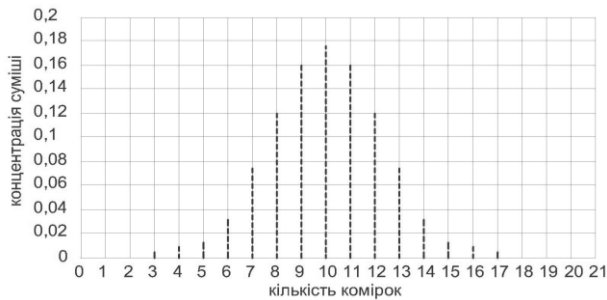


б

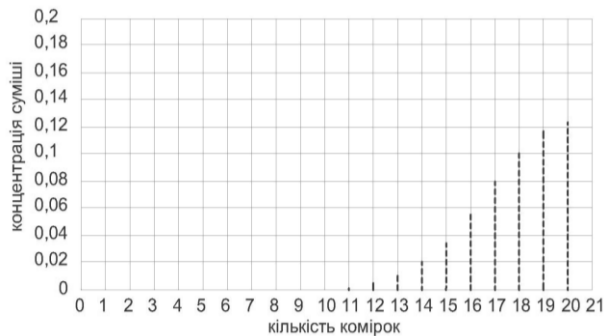
Рис. 1 – Розподіл ключового компонента у комірках змішувача для ГКЗ із $\psi_T = 0,8$ (суцільна лінія) та $\psi_T = 0,2$ (пунктирна лінія), відповідно, при $n_t = 20$ (а) та $n_t = 25$ (б)

Рекомендоване значення коефіцієнта заповнення ГКЗ становить $\psi_T = 0,5$. Подальше зростання коефіцієнта призводить до зростання енергоємності та зниження якості об'ємного змішування компонентів.

Кутову швидкість доцільно визначити із залежності для коефіцієнта швидкохідності $P_k = Da^2/(2g)$ за умови, що його значення має знаходитися в межах 1,5–2,0. Найбільш ефективним з огляду на забезпечення згладжувальної здатності змішувача та якості об'ємного змішування компонентів є розташування по периферії гвинта отворів певної форми. У цьому випадку можлива різна ймовірність переходу частинок компонентів між різними комірками, тому розподіл індикатора у комірках в процесі змішування може дещо відрізнятись від біноміального. Проте, загальний принцип побудови моделі змішування буде той самий. Як продемонстрували результати дослідження, зазначені відмінності будуть незначними, оскільки вирішальний вплив на розподіл індикатора у комірках має інтегральний показник – коефіцієнт ψ_T впливу пересипання на продуктивність ГКЗ.



а



б

Рис. 2 – Розподіл ключового компонента у комірках змішувача для ГКЗ із $\psi_T = 0,5$, відповідно, при $n_t = 20$ (а) та $n_t = 40$ (б)

Висновки

Розроблена модель процесу неперервного змішування сипких компонентів дозволила зменшити кількість варіантів пошуку раціональних конструкцій гвинтових конвеєрів-змішувачів при їх структурно-параметричному синтезі, що, у свою чергу, дозволило запропонувати нову конструкцію ГКЗ із перфорованою зовнішньою крайкою гвинтової стрічки. Ця конструкція ГКЗ забезпечує рівномірний розподіл компонентів у потоці та в суміші на виході із змішувача, високу згладжуючу здатність та мінімальну енерго- та металоємність.

Список посилань

1. Бурлака, В., Водяницький, Г., Тимків, В. (2016). Оцінка технічного рівня кормороздавачів-змішувачів світових виробників. Тваринництво України, 3, 8–12. http://nbuv.gov.ua/UJRN/TvUkr_2016_3_5
2. Шацкий, В.В., Мілько, Д.А., Болтянський, Б.В., Коломиец, С.М., Семенов, В.И. (2013). Якість змішування компонентів раціону – основа підвищення продуктивності тварин. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету, 1(3), 43–50.
3. Ляшук, О.Л. (2014). Результати експериментальних досліджень неоднорідності змішування сипких матеріалів гвинтовим гофрованим робочим органом. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, 144, 117–122.
4. Рябов, Р.М., Мілько, Д.О. (2016). Аналіз теоретичних досліджень процесу змішування. Вісник Сумського національного аграрного університету. Механізація та автоматизація виробничих процесів, 10/2(30), 102–106.
5. Дереза, О.О., Дереза, С.В. (2014). Аналіз методів моделювання процесу змішування кормів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету, 4(1), 95–100.
6. Walton, O.R. (1993). Numerical simulation of inelastic, frictional particle-particle interactions. In: M.C. Roco (ed.): Particulate Two-Phase Flow. Butterworth-Heinemann, Stoneham, MA, 884–911.
7. Yaraghi, A., Ebrahimi, M., Ein-Mozaffari, F., Ali Lohi, A. (2018). Mixing assessment of non-cohesive particles in a paddle mixer through experiments and discrete element method (DEM). Advanced Powder Technology, 29(11), 2693–2706.
8. Шевченко, І.А., Алісв, Е.Б., Доруда, С.О. (2013). Моделювання процесу потокового змішування кормосумішей з використанням методу дискретних елементів. Механізація та електрифікація сільського господарства, 97(1), 536–544. http://nbuv.gov.ua/UJRN/mesg_2013_97%281%29_63
9. Рогатинський, Р.М., Гевко, І.Б., Дмитрів, Д.В. (2000). Моделювання роботи малогабаритного лопатоговинтового змішувача. Сільськогосподарські машини, 6, 129–135.
10. Сацюк, В.В. (2016). Оцінка згладжуючої здатності змішувачів безперервної дії. Сільськогосподарські машини, 35, 88–91.