

УДК 621.82

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.133-143](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.133-143)

А.Є. Дячун, доц., канд. техн. наук, І.Б. Гевко, проф., д-р техн. наук, Р.З. Золотий, доц., канд. техн. наук, С.О. Коваль, асп., О.Б. Дериш, асп., А.О. Брикса, асп.

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна*

*e-mail: dyachun\_andriy@ukr.net*

## Результати експериментальних досліджень якості змішування сипких матеріалів автоматизованою установкою гвинтового конвеєра з обертовим кожухом

Розроблено та виготовлено дослідний зразок автоматизованого гвинтового конвеєра з регульованою подачею матеріалу у зоні завантаження із бункера та з наданим обертотворим рухом кожуху в напрямку обертання шнека для одночасного змішування та транспортування сипких матеріалів. Проведено експериментальні дослідження для визначення закономірностей взаємозв'язку конструктивних та технологічних параметрів гвинтового конвеєра-змішувача, зокрема частоти обертання шнека, частоти обертання кожуха, кута нахилу шнекового змішувача, із коефіцієнтом неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів: зерен кукурудзи, проса, гороху, пшениці, гречки. Проведено статистичне оброблення даних результатів експериментальних досліджень з одержанням рівнянь регресії у кодіваних та натуральних величинах залежності коефіцієнта неоднорідності змішування гвинтовим конвеєром від його конструктивних та технологічних незалежних змінних параметрів а також перевірку адекватності одержаних рівнянь за допомогою прикладного програмного забезпечення.

**змішування, гвинтовий конвеєр, автоматизована установка, коефіцієнт неоднорідності змішування, сипкий матеріал, зерна, рівняння регресії**

**Постановка проблеми.** Висока надійність, екологічність, можливість роботи в потокових виробничих системах та порівняно низька вартість прямоочних гвинтових конвеєрів-змішувачів є причиною широкого їх використання в агровиробництві, харчовій, хімічній, фармацевтичній промисловості та інших галузях виробництва для виготовлення сумішей. Перевагою гвинтових змішувачів неперервної дії є те, що процес проходить неперервно, що забезпечує високу продуктивність змішування компонентів суміші та його просту автоматизацію. Проте інтенсивність перемішування у таких змішувачів, порівняно із періодичними, невисока і досягнення високих показників однорідності суміші досягається збільшенням часу перебування суміші у робочій зоні, що, як правило, призводить до збільшення довжини змішувачів, їх матеріало- та енергоємності. Зменшення вказаних показників забезпечується вибором раціональних параметрів та режимів роботи гвинтових конвеєрів-змішувачів, при яких реалізується зрив гвинтового потоку суміші та інтенсифікується її змішування.

Ефективність процесу змішування гвинтовими конвеєрами залежить від їх конструктивних особливостей, матеріалів робочих елементів, швидкості і часу змішування, властивостей компонентів, що піддаються змішуванню, таких як розміри частинок, вологість, коефіцієнти тертя. Дослідження впливу цих параметрів аналітичними методами є складними і не забезпечують достатньої точності, тому важливими є експериментальні дослідження із проектуванням і виготовленням установок гвинтових конвеєрів, зокрема із обертовими кожухами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Принцип роботи прямоточних гвинтових конвеєрів-змішувачів базується на особливостях транспортування сипкого вантажу гвинтовими конвеєрами, при якому проходить перемішування шарів при проходженні суміші робочим простором [1]. В працях [2, 3] показано, що таке перемішування найбільш інтенсивно відбувається у гвинтових конвеєрах при перехідних режимах, які характерні при переході від тихохідного до швидкохідного транспортування. Там же детально розглянута кінематика та динаміка гвинтових конвеєрів. Особливості роботи гвинтових конвеєрів-змішувачів наведено в [4]. Для виявлення особливості руху різних компонентів у гвинтових конвеєрах та аналізу їх кінематичних і динамічних показників, а також продуктивності, у [5] використано метод дискретних елементів (DEM). Візуалізація переміщень частинок в потоці вантажу гвинтових конвеєрів змішувачів із їх перемішуванням, наведена в [6]. Чисельне дослідження змішування частинок у шнековому змішувачі методом дискретних елементів наведено в [7]. Синтез змішувачів з гвинтовими робочими органами проведений в [8]. Інтенсифікація процесів змішування виконанням профільованих шнеків та забезпечення належної якості суміші шляхом зміни робочого простору у телескопічних змішувачах розглянута в [9]. В [10] розроблено перспективну конструкцію гвинтового конвеєра-змішувача із введеними додатковими лопатями для кращого захвату суміші в обертовий рух та проведено її дослідження методом DEM. Дослідження п'яти різних конструкцій спеціальних гвинтових конвеєрів-змішувачів різної довжини з використанням DEM наведено в [11, 12]. Аналіз відомих результатів досліджень показав, що одним із найбільш перспективних напрямів підвищення якості змішування, підвищення продуктивності процесу, зменшення часу перебування компонентів в робочій зоні та зниження матеріалоємності обладнання є використання вдосконалених гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом. Захват суміші обертовим кожухом гвинтового конвеєра-змішувача проходить аналогічно, як в барабанних млинах, особливості якого детально описано в [13]. У статті [14] подана конструкція експериментальної автоматизованої установки гвинтового конвеєра з обертовим кожухом для уточнення параметрів моделі транспортування і змішування сумішей. Більшість із розглянутих конструкцій та способів змішування можуть забезпечити якісний розподіл компонентів по об'єму, проте не всі забезпечують їх належну згладжуючу здатність, тобто стабільність співвідношення компонентів в часі.

**Постановка завдання.** Метою завдання є проведення та представлення результатів експериментальних досліджень якості змішування сипких матеріалів автоматизованою установкою гвинтового конвеєра з обертовим кожухом.

**Виклад основного матеріалу.** Для виконання поставлених завдань, перевірки адекватності теоретичних досліджень, здійснення практичної перевірки ефективності змішування з одночасним транспортуванням сільськогосподарських матеріалів запропонованими конструкціями гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом [14], одержаних внаслідок морфологічного аналізу та синтезу, проведено експериментальні дослідження у лабораторіях кафедри автомобілів ТНТУ.

В процесі виконання експериментальних та теоретичних досліджень вносились зміни з метою вдосконалення запропонованих гвинтових конвеєрів-змішувачів та вибору раціонального варіанту конструкції, встановлювались межі основних факторів, що впливають на якість змішування та характеризують особливості роботи і конструкції запропонованого гвинтового конвеєра-змішувача.

Програма експериментальних досліджень охоплювала такі етапи:

- розроблення та виготовлення дослідного зразка автоматизованого гвинтового конвеєра з регульованою подачею матеріалу у зоні завантаження із бункера та з наданим обертовим рухом кожуху в напрямку обертання шнека для одночасного змішування та транспортування матеріалів;

- проведення експериментальних досліджень для визначення закономірностей взаємозв'язку конструктивних та технологічних параметрів гвинтового конвеєра-змішувача, зокрема частоти обертання шнека  $n_1$ , частоти обертання кожуха  $n_2$ , кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача, із коефіцієнтом неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів: зерен кукурудзи, проса, гороху, пшениці, гречки;

- збір та проведення статистичної обробки даних результатів експериментальних досліджень з одержанням рівнянь регресії у кодованих та натуральних величинах залежності функціональних параметрів гвинтового конвеєра-змішувача від його конструктивних та технологічних незалежних змінних параметрів а також перевірка адекватності одержаних рівнянь за допомогою прикладного програмного забезпечення.

Одним із етапів програми експериментальних досліджень є розроблення та виготовлення конструкції експериментальної автоматизованої установки гвинтового конвеєра з обертовим кожухом для визначення і вибору раціональних параметрів процесу одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів.

На основі попередньо виконаного літературно-патентного пошуку та модифікованого морфологічного аналізу здійснено синтез та одержано патенти України на корисні моделі на декілька конструкцій шнекових конвеєрів з обертовими кожухами, що забезпечують одночасне транспортування та змішування сипких матеріалів. Для дослідження запропонованих конструкцій шнекових конвеєрів спроектовано і виготовлено експериментальну установку [14].

Дослідний зразок експериментальної автоматизованої установки гвинтового конвеєра з обертовим кожухом із можливістю зміни кута нахилу змішувача, частоти та напрямку обертання шнека та кожуха, зміни конструкції шнеків зображено на рисунках 1, 3 та 4. Основними конструктивними елементами є рама 1, на якій розміщено бункер 2 із перегородками та шиберами, обертовий кожух 3 із розташованим в середині шнеком, електродвигуни 4 та 5 для приводу обертання кожуха та шнека, вивантажувальний патрубков 6, ємність 7 для збирання змішаних сипких матеріалів 8. До електродвигунів 4 та 5 за під'єднано два окремих перетворювачі 9 частоти струму (Altivar 71), що подається із мережі до електродвигунів. Керування та програмування роботою перетворювачів частоти струму, а відповідно і електродвигунами та конвеєром загалом здійснюється за допомогою двох ПК 10 з програмним забезпеченням PowerSuite, а також із застосуванням мікроконтролера із відповідним програмним забезпеченням. Детальніше установка описана у статті [14].

До проведення процесу одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів та після його проведення здійснювали зважування цих матеріалів електронними вагами (рис. 2) з метою визначення рівня концентрації головного компонента в пробах одержаних сумішей та продуктивності транспортування.

Після зважування сипкі матеріали завантажувались у бункер гвинтового конвеєра-змішувача у відділення між перегородками (рис. 3) із закритими шиберами отворами для пересипання.

Після запуску двигунів відбувалось переміщення шиберів у бункері на регульовану величину із попаданням матеріалу на шнек конвеєра з наступним його переміщенням та змішуванням (рис. 4).



Рисунок 1 - Фото загального вигляду експериментальної установки

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 2 - Зважування зернових матеріалів після змішування

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 3 - Завантажені зерна кукурудзи 1, гречки 2 та проса 3 у бункер гвинтового конвеєра-змішувача у відділення між перегородками

Джерело: розроблено авторами

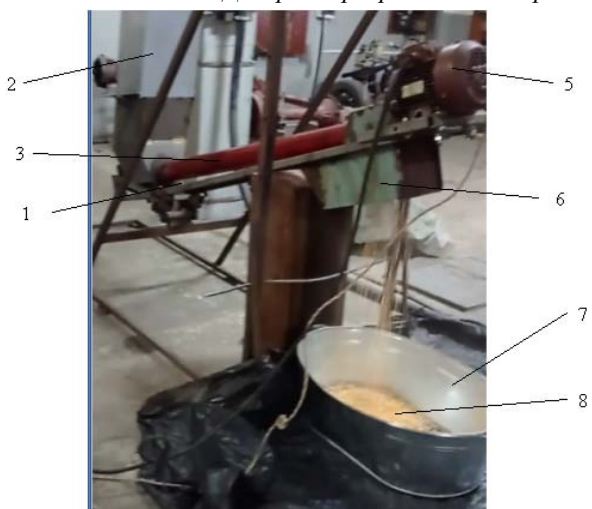


Рисунок 4 - Фрагмент процесу транспортування та змішування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром-змішувачем

Джерело: розроблено авторами

На основі вибору змінних вхідних факторів, рівнів їх варіювання та розрахунків одержано таблицю 1 при дослідженні коефіцієнта неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів.

Проведено три основні досліді: при змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса (ключовий компонент – зерна проса (20%), умовні компоненти – зерна кукурудзи (40%) та гречки (40%); при змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки (ключовий компонент – зерна гречка (20%), умовний компонент – зерна кукурудзи (80%); при змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху (ключовий компонент – зерна гороху (20%), умовний компонент – зерна пшениці (80%).

Таблиця 1 – Результати кодування факторів та рівні їх варіювання при дослідженні коефіцієнта неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур.(кодовані)		
	натур.	код.				
Частота обертання шнека	$n_1$ , об/хв	$x_1$	50	350 (+1)	300 (0)	250 (-1)
Частота обертання кожуха у напрямку обертання шнека	$n_2$ , об/хв	$x_2$	50	200 (+1)	150 (0)	100 (-1)
Кут нахилу шнекового змішувача	$\alpha$ , град	$x_3$	15	30 (+1)	15 (0)	0 (-1)

Джерело: розроблено авторами

Загальний вигляд рівняння регресії коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса за результатами проведених експериментів у кодованих та натуральних величинах має вигляд відповідно:

$$K_{1(x_1, x_2, x_3)} = 9 + 0,551x_1 - 0,801x_2 - 0,626x_3 + 0,116x_1x_2 - 0,054x_1x_3 + 0,019x_2x_3 + 0,155x_1^2 - 0,055x_2^2 + 0,25x_3^2, \quad (1)$$

$$K_{1(n_1, n_2, \alpha)} = 15,88 - 0,032n_1 - 0,024n_2 - 0,057\alpha + 4,64 \cdot 10^{-5}n_1n_2 - 7,2 \cdot 10^{-5}n_1\alpha + 2,53 \cdot 10^{-5}n_2\alpha + 6,2 \cdot 10^{-5}n_1^2 - 2,2 \cdot 10^{-5}n_2^2 + 1,11 \cdot 10^{-3}\alpha^2. \quad (2)$$

Використовуючи дані результатів експериментальних досліджень, рівняння регресії (2), в межах змінних вхідних факторів за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим конвеєром з обертовим кожухом, що представлено на рис. 5 та 6.

Аналізуючи рівняння регресії (1) встановлено, що основним фактором, який впливає на коефіцієнт неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом є фактор  $x_2(n_2)$ . Менший вплив має фактор  $x_3(\alpha)$  і найменший - фактор  $x_1(n_1)$ . Зростання другого і третього факторів призводить до зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування, а зростання першого – до збільшення коефіцієнта неоднорідності змішування.

З рисунків 5, 6 та рівняння регресії (2) зроблено висновки, що максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування дорівнювало 11,28 %, а мінімальне – 7,32 %. Збільшення частоти обертання шнека  $n_1$  від 250 об/хв до 350 об/хв призводить до зростання коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,1 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха  $n_2$  від 100 об/хв до 200 об/хв забезпечує зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,22 рази, а зміна кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача від 0 град до 30 град сприяє зменшенню коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,12 рази.

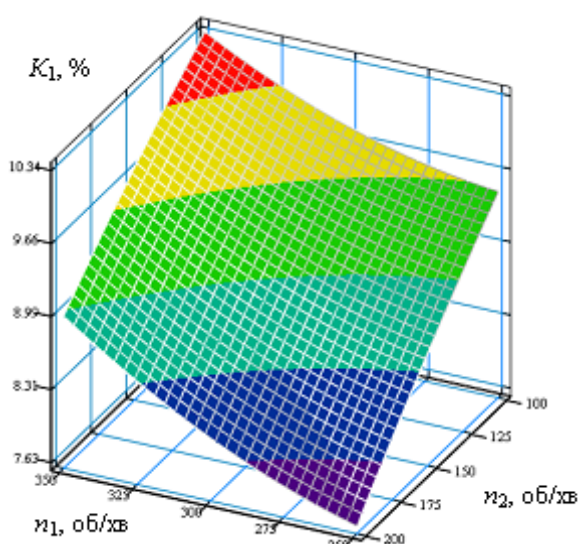


Рисунок 5 - Поверхня відгуку залежності коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека  $n_1$  та частоти обертання кожуха  $n_2$  ( $\alpha = 15$  град)  
Джерело: розроблено авторами

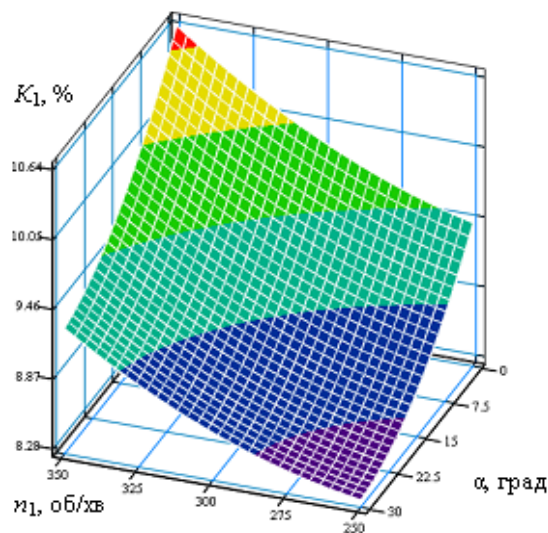


Рисунок 6 - Поверхня відгуку залежності коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека  $n_1$  та кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача ( $n_2 = 150$  об/хв)  
Джерело: розроблено авторами

Загальний вигляд рівняння регресії коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки за результатами проведених експериментів у кодованих та натуральних величинах має вигляд відповідно:

$$K_2(x_1, x_2, x_3) = 8,505 + 0,73x_1 - 0,69x_2 - 0,61x_3 + 0,1x_1x_2 - 0,05x_1x_3 + 0,025x_2x_3 + 0,142x_1^2 - 0,058x_2^2 + 0,242x_3^2, \quad (3)$$

$$K_2(n_1, n_2, \alpha) = 14,58 - 0,0302n_1 - 0,0214n_2 - 0,0546\alpha + 4 \cdot 10^{-5} n_1 n_2 - 6,67 \cdot 10^{-5} n_1 \alpha + 3,33 \cdot 10^{-5} n_2 \alpha + 5,68 \cdot 10^{-5} n_1^2 - 2,32 \cdot 10^{-5} n_2^2 + 1,075 \cdot 10^{-3} \alpha^2. \quad (4)$$

Використовуючи дані результатів експериментальних досліджень, рівняння регресії (4), в межах змінних входних факторів, за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим конвеєром з обертовим кожухом, що представлено на рис. 7 та 8.

З рисунків 7, 8 та рівняння регресії (4) зроблено висновки, що максимальне

значення коефіцієнта неоднорідності змішування дорівнювало 10,8 %, а мінімальне – 6,8 %. Збільшення частоти обертання шнека  $n_1$  від 250 об/хв до 350 об/хв призводить до зростання коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,15 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха  $n_2$  від 100 об/хв до 200 об/хв забезпечує зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,20 рази, а зміна кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача від 0 град до 30 град сприяє зменшенню коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,14 рази.

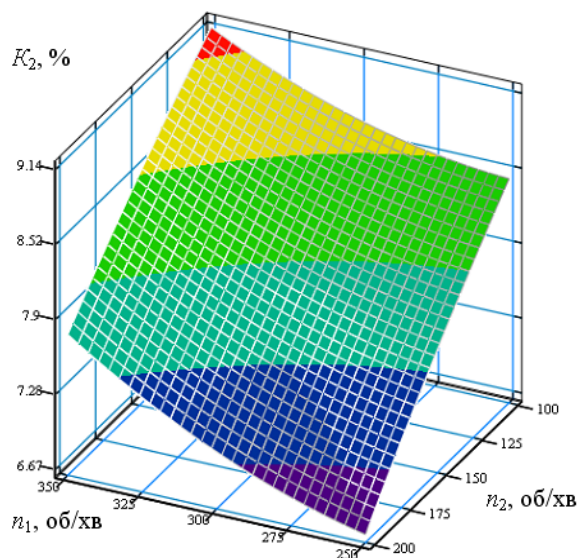


Рисунок 7 - Поверхня відгуку залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека  $n_1$  та частоти обертання кожуха  $n_2$  ( $\alpha = 15$  град)  
Джерело: розроблено авторами

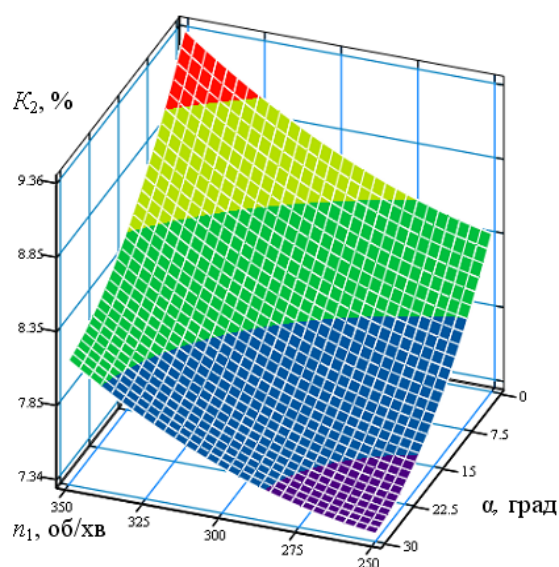


Рисунок 8 - Поверхня відгуку залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека  $n_1$  та кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача ( $n_2 = 150$  об/хв)  
Джерело: розроблено авторами

Загальний вигляд рівняння регресії коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху за результатами проведених експериментів у кодованих та натуральних величинах має вигляд відповідно:

$$K_{3(x_1, x_2, x_3)} = 7,652 + 0,348x_1 - 0,66x_2 - 0,507x_3 + 0,09x_1x_2 - 0,043x_1x_3 + 0,015x_2x_3 + 0,118x_1^2 - 0,042x_2^2 + 0,203x_3^2, \quad (5)$$

$$K_{3(n_1, n_2, \alpha)} = 13,53 - 0,0259n_1 - 0,0193n_2 - 0,0467\alpha + 3,6 \cdot 10^{-5}n_1n_2 - 5,73 \cdot 10^{-5}n_1\alpha + 2 \cdot 10^{-5}n_2\alpha + 4,72 \cdot 10^{-5}n_1^2 - 1,68 \cdot 10^{-5}n_2^2 + 9,02 \cdot 10^{-4}\alpha^2. \quad (6)$$

Використовуючи дані результатів експериментальних досліджень, рівняння регресії (6), в межах змінних вхідних факторів за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим конвеєром з обертовим кожухом, що представлено на рис. 9 та 10.

Максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування дорівнювало 9,41 %, а мінімальне – 6,4 %. Збільшення частоти обертання шнека  $n_1$  від 250 об/хв до

350 об/хв призводить до зростання коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,07 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха  $n_2$  від 100 об/хв до 200 об/хв забезпечує зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,21 рази, а зміна кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача від 0 град до 30 град сприяє зменшенню коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,11 рази.

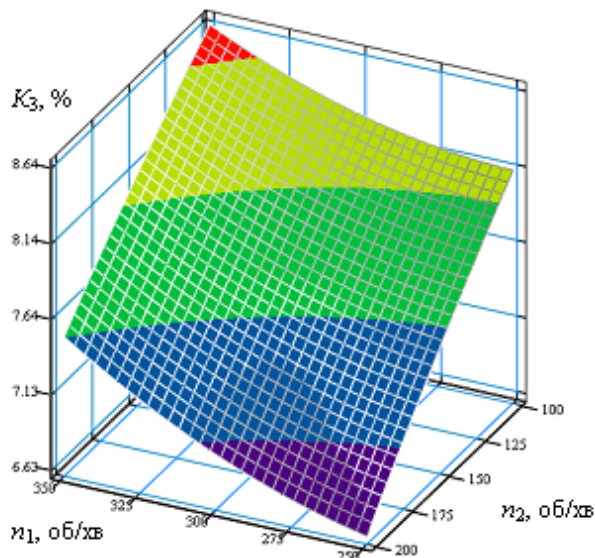


Рисунок 9 - Поверхня відгуку залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека  $n_1$  та частоти обертання кожуха  $n_2$  ( $\alpha = 15$  град)  
Джерело: розроблено авторами

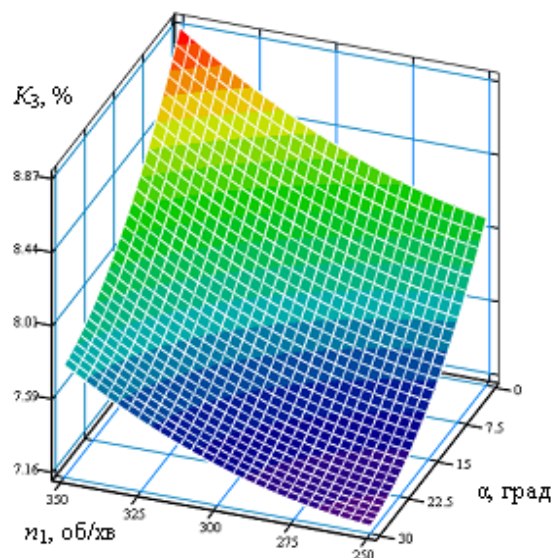


Рисунок 10 - Поверхня відгуку залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека  $n_1$  та кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача ( $n_2 = 150$  об/хв)  
Джерело: розроблено авторами

### Висновки:

1. Представлено результати експериментальних досліджень із використанням розробленого та виготовленого дослідного зразка автоматизованої установки гвинтового конвеєра з регульованою подачею матеріалу у зоні завантаження із бункера та з наданим обертовим рухом кожуху в напрямку обертання шнека для одночасного змішування та транспортування зернових матеріалів, під час яких визначали закономірності взаємозв'язку конструктивних та технологічних параметрів шнекового змішувача, зокрема частоти обертання шнека  $n_1$ , частоти обертання кожуха  $n_2$ , кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача із коефіцієнтом неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів: зерен кукурудзи, проса, гороху, пшениці, гречки. у таких межах зміни вхідних факторів:  $250 \leq n_1 \leq 350$  (об/хв);  $100 \leq n_2 \leq 200$  (об/хв);  $0 \leq \alpha \leq 30$  (град).

2. Встановлено, що при зменшенні частоти обертання шнека та збільшенні частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної та двохкомпонентних сумішей зменшується. Максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса дорівнювало 11,28 %, а мінімальне – 7,32 %. Для двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування дорівнювало 10,8 %, а мінімальне – 6,8 %. Для двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування дорівнювало 9,41 %, а

мінімальне – 6,4 %. Збільшення частоти обертання шнека  $n_1$  від 250 об/хв до 350 об/хв призводить до зростання коефіцієнта неоднорідності змішування: в 1,14 рази трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса; в 1,15 рази двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки, в 1,07 рази двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху. При цьому збільшення частоти обертання кожуха  $n_2$  від 100 об/хв до 200 об/хв забезпечує зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування: в 1,22 рази трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса; в 1,2 рази двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки, в 1,21 рази двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху. Зміна кута нахилу  $\alpha$  шнекового змішувача від 0 град до 30 град сприяє зменшенню коефіцієнта неоднорідності змішування: в 1,12 рази трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса; в 1,14 рази двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки; в 1,11 рази двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху.

3. Коефіцієнт неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші шнековим змішувачем з обертовим кожухом є в 1,64 рази меншим ніж коефіцієнт неоднорідності змішування звичайним гвинтовим конвеєром із спіральним гвинтовим робочим органом в межах досліджуваних частот обертання шнеків від 250 об/хв до 350 об/хв.

## Список літератури

1. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Гудь В.З., Дячун А.Є., Мельничук А.Л., Слободян Л.М. Перспективні гвинтові конвеєри: конструкції, розрахунок, дослідження. Тернопіль, 2019. 212 с.
2. Dheeraj M., Abhishek S., Harsh P., Ram D., Jyeshtharaj B., Shankar S. A review of granular flow in screw feeders and conveyors. *Powder Technology*. 2020. Vol. 366. P. 369-381.
3. Hewko B.M., Popovich P.V., Diachun A.Y., Lyashuk O.L., Liubachivskiy R.O. The study of bulk material kinematics in a screw conveyor-mixer. *INMATEH: Agricultural engineering*. Bucharest/Romania, 2015. Vol. 47. No. 3. P. 156-163.
4. Rohatynskiy R., Gevko I., Diachun A., Lyashuk O., Skyba O., Melnychuk A. Feasibility study of improving the transport performance by means of screw conveyors with rotary casings. *Acta Technologica Agriculturae*. Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae, 2019. 4/2019. P. 141-146.
5. Hu, G., Chen, J., Jian, B., Wan, H., Liu, L. Modeling and simulation of transportation system of screw conveyors by the discrete element method. *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, MACE 2010*. Article number 5536244. P. 927-930.
6. Aca Jovanović, Lato Pezo, Sanja Stanojlović, Nenad Kosanić, Ljubinko Lević. Discrete element modelling of screw conveyor-mixers. *Hem. Ind.* 2015. 69 (1). P. 95-101.
7. Liqing S. Xiaodi Z. Qingliang Z., Kuidong G., Kao J., Jiawei Z. Application of a screw conveyor with axial tilt blades on a shearer drum and investigation of conveying performance based on DEM. *Particuology*. 2022. Vol. 61. P. 91-102.
8. Гудь В.З. Синтез змішувачів з гвинтовими робочими органами. *Журнал «Інженерія природокористування»*. Харків, 2020. Вип. 1(15). С. 66-72.
9. Гудь В.З., Клендій В.М., Шуст І.М. Результати досліджень телескопічного гвинтового транспортера. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк, 2019. Вип. 42. С. 12-20.
10. Fenglei Q., Theodore J. H., Mark Mba W. Numerical study of particle mixing in a lab-scale screw mixer using the discrete element method. *Powder Technology*. 2017. Vol. 308. P. 334-345.
11. Milada P., Lato P., Aca J., Anja T., Ljubiša A., Biljana L., Predrag K. Discrete element model of particle transport and premixing action in modified screw conveyors. *Powder Technology*. 2018. Vol. 336. P. 255-264.
12. Lato P., Aca J., Milada P., Radmilo Č., Biljana L. Modified screw conveyor-mixers – Discrete element modeling approach. *Advanced Powder Technology*. 2015. Vol. 26, Issue 5, P. 1391-1399.
13. Науменко Ю.В. Основи теорії режимів роботи барабаних млинів: монографія. Рівне: Видавництво СПД Зелент О.І., 2009. 282 с.
14. Дячун А.Є., Дмитрів О.Р., Гевко Б.Р., Коваль С.О., Цапик Р.П. Експериментальна автоматизована установка гвинтового конвеєра з обертовим кожухом для змішування сипких матеріалів. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2024. Вип. 24. С. 38-44.

## References

1. Rohatynskiy R.M., Hevko I.B., Liashuk O.L., Hud V.Z., Diachun A.Ie., Melnychuk A.L. & Slobodian L.M. (2019). Prospective screw conveyors: designs, calculations, research. Ternopil [in Ukrainian].
2. Dheeraj M., Abhishek S., Harsh P., Ram D., Jyeshtharaj B. & Shankar S. (2020). A review of granular flow in screw feeders and conveyors. *Powder Technology*, 366. P. 369-381.
3. Hewko B.M., Popovich P.V., Diachun A.Y., Lyashuk O.L. & Liubachivskiy R.O. (2015). The study of bulk material kinematics in a screw conveyor-mixer. *INMATEH: Agricultural engineering*, Bucharest/Romania, 47, 3. P. 156-163.
4. Rohatynskiy R., Gevko I., Diachun A, Lyashuk O., Skyba O. & Melnychuk A. (2019). Feasibility study of improving the transport performance by means of screw conveyors with rotary casings. *Acta Technologica Agriculturae*. Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae, 4/2019. P. 141-146.
5. Hu, G., Chen, J., Jian, B., Wan, H. & Liu, L. (2010). Modeling and simulation of transportation system of screw conveyors by the discrete element method. *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, MACE 2010*, 5536244. P. 927-930.
6. Aca Jovanović, Lato Pezo, Sanja Stanojlović, Nenad Kosanić & Ljubinko Lević. (2015). Discrete element modelling of screw conveyor-mixers. *Hem. Ind*, 69 (1). P. 95–101.
7. Liqing S. Xiaodi Z. Qingliang Z., Kuidong G., Kao J. & Jiawei Z. (2022) Application of a screw conveyor with axial tilt blades on a shearer drum and investigation of conveying performance based on DEM. *Particuology*, 61. P. 91-102.
8. Gud V.Z. (2020). Synthesis of mixers with screw working bodies. *Journal "Environment Engineering"*, Harkiv, 1(15). P. 66-72 [in Ukrainian].
9. Hud V.Z., Klendii V.M. & Shust I.M. (2019). Research results of the telescopic screw conveyor. *Agricultural machines*, Lutsk, 42. P. 12-20 [in Ukrainian].
10. Fenglei Q., Theodore J. H. & Mark Mba W. (2017). Numerical study of particle mixing in a lab-scale screw mixer using the discrete element method. *Powder Technology*, 308. P.334-345.
11. Milada P., Lato P., Aca J., Anja T., Ljubiša A., Biljana L. & Predrag K. (2018) Discrete element model of particle transport and premixing action in modified screw conveyors. *Powder Technology*, 336.P. 255-264.
12. Lato P., Aca J., Milada P., Radmilo Č. & Biljana L. (2015) Modified screw conveyor-mixers – Discrete element modeling approach. *Advanced Powder Technology*, 26, 5. P. 1391-1399.
13. Naumenko Yu.V. (2009) Fundamentals of the theory of operating modes of drum mills: monograph. Rivne [in Ukrainian].
14. Diachun A.Ie., Dmytriv O.R., Hevko B.R., Koval S.O. & Tsapyk R.P. (2024). Experimental automated installation of a screw conveyor with a rotating casing for mixing bulk materials. *Prospective technologies and devices*, Lutsk, 24. P. 38-44 [in Ukrainian].

**Andrii Diachun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Hevko**, Prof., DSc, **Roman Zolotyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Koval**, post-graduate, **Oleg Derysh**, post-graduate, **Andrii Bryksa**, post-graduate  
*Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine*

### **The Results of Experimental Studies of the Quality of Bulk Materials Mixing by an Automated Installation of a Screw Conveyor with a Rotating Casing**

The study of the effectiveness of mixing process by screw conveyor using analytical methods is difficult and does not provide sufficient accuracy, so experimental studies with the design and manufacture of screw conveyor installations, in particular with rotating casings, are important. The purpose of the work is to conduct and present the results of experimental research on the bulk materials mixing quality using an automated installation of a screw conveyor with a rotating casing.

A prototype of an automated screw conveyor with adjustable material supply in the area of loading from the hopper and with provided rotary movement of the casing in the direction of rotation of the screw for simultaneous mixing and transportation of bulk materials was developed and manufactured. The experimental studies were conducted to determine the relationship between the structural and technological parameters of the screw conveyor-mixer, in particular the rotation frequency of the screw, the rotation frequency of the casing, the angle of inclination of the screw mixer, with the coefficient of inhomogeneity of mixing a combination of different bulk materials: grains of corn, millet, peas, wheat, buckwheat. Statistical processing of data from the results of experimental studies was carried out to obtain regression equations in coded and natural values of the dependence of the coefficient of inhomogeneity of mixing by a screw conveyor on its constructive and technological independent variable parameters, as well as checking the adequacy of the obtained equations using application software.

It was established that with a decrease in the rotation frequency of the screw and an increase in the rotation frequency of the casing and the angle of inclination of the screw mixer, the value of the coefficient of inhomogeneity of the mixing of three-component and two-component mixtures decreases. The maximum value of the coefficient of inhomogeneity of the three-component mixture of corn, buckwheat and millet grains was 11.28%, and the minimum value was 7.32%. The coefficient of inhomogeneity of mixing of a two-component mixture by a screw mixer with a rotating casing is 1.64 times smaller than the coefficient of inhomogeneity of mixing by a conventional screw conveyor with a spiral screw working body within the studied screw rotation frequencies from 250 rpm to 350 rpm.

**mixing, screw conveyor, automated installation, coefficient of inhomogeneity of mixing, bulk material, grains, regression equation**

*Одержано (Received) 16.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 20.10.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*

УДК 621.86

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.143-154](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.143-154)

**І.Б. Гевко**, проф., д-р техн. наук, **А.Є. Дячун**, доц., канд. техн. наук,

**Р.М. Рогатинський**, проф., д-р техн. наук, **Т.А. Довбуш**, доц., канд. техн. наук,

**В.М. Бучинський**, асп.

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна*

*e-mail: gevkoivan1@ukr.net*

## Синтез накопичувально-завантажувальних бункерів з елементами автоматизації

Проведено генерування ефективних конструкцій накопичувально-завантажувальних бункерних систем з елементами автоматизації на основі застосування структурно-схемного синтезу методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу. В результаті проведеного синтезу отримано 57 варіантів конструктивних рішень накопичувально-завантажувальних бункерів, схеми шести з них відображено на рисунках. Їх перевагами є здатність зміни об'єму накопичення, можливість збурення сипкого середовища і уникнення його заклинювання, забезпечення примусової інтенсивної подачі матеріалів при вивантаженні із бункерів, здатність розпушувати сипкі матеріали та забезпечувати рівномірне завантаження конвеєра. На одержані конструкції подано заявки на отримання патентів України. Розроблено схему автоматизованої адаптивної системи граничного керування гвинтовим конвеєром із накопичувально-завантажувальним бункером, яка забезпечує постійне значення заданих виробничих параметрів, зокрема продуктивності транспортування сипких матеріалів, потужності приводу шнека при дії різних зовнішніх факторів.

**структурно-схемний синтез, накопичення, завантаження, бункер, елемент, гвинтовий конвеєр, автоматизація**

**Постановка проблеми.** Накопичувально-завантажувальні системи, у тому числі бункери, мають широке застосування у сільському господарстві, будівельній, транспортній, фармацевтичній, харчовій і переробній та багатьох інших галузях економіки. Їх основним завданням є накопичення, зберігання і видача компонентів різноманітного структурного складу у необхідних кількостях із дотриманням санітарних, гігієнічних, техніко-економічних та інших вимог.