**Алієв Е. Б.**д.т.н., старший дослідник,
професор**Павленко С. І.**

к.т.н., доцент

**Дніпровський
державний аграрно-
економічний
університет****Aliiev E.**Doctor of Technical Sciences,
senior researcher, professor**Pavlenko S.**

Ph.D., Associate Professor

**Dnipro State Agrarian and
Economic University****УДК 631.363:636.087****DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-4****СИМУЛЯЦІЯ ПРОЦЕСУ
ФОРМУВАННЯ БУРТА І
ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ
КОМПОСТНОЇ СУМІШІ
ОДНОБАРАБАННИМ АЕРАТОРОМ**

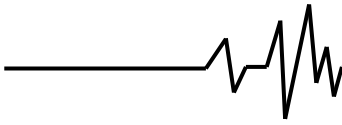
Найбільше розповсюдження для виконання технологічного процесу виробництва органічних компостів отримали мобільні аератори-змішувачі роторно-барабанного типу. Узагальнюючі дані по аналізу конструкцій технічного забезпечення механізованого компостування, проведених попередніх теоретичних і експериментальних досліджень відомих науковців, власних пошукових досліджень встановлено, що механізоване виробництво компостів потребує додаткового вивчення. Так, аналіз показав, що ефективними є роторні барабанно-лопатеві робочі органи. Однак, недостатньо досліджені залежності зміни висоти бурту при формуванні, показники однорідності і структурності суміші, енергоємності при роботі барабанно-лопатевих робочих органів від частоти обертання, швидкості переміщення робочого органу і геометричних параметрів лопатей. Не досліджені зміни об'ємної маси, структурності суміші, пошарового розподілу температури в бурті під дією робочих органів. Це обумовлювало актуальність проведення досліджень згідно вибраного напрямку.

Аналіз розроблених моделей процесу взаємодії робочого органу із компостною сумішшю показав, що їх не можливо використовувати для оцінки якості змішування і формування бурта, так як необхідно розглядати рух системи дискретних часток, з яких складається компостна суміш. В свою чергу математичний опис руху дискретних елементів можливий з використанням сучасних CAE-систем, однією з якої є Simcenter Star-CCM+

За результатами чисельного моделювання технологічного процесу формування бурта і змішування компонентів компостної суміші провести обґрунтування конструктивно-режимних параметрів робочого органу однобарабанного аератора.

Для побудови фізико-математичної моделі процесів змішування компостної суміші і формування бурта використані наступні сіткові і фізичні моделі: безсіткова DEM, інтерполяція рішення, Лагранжева багатофазність, нестационарний неявний, модель дискретних елементів DEM, багатофазна взаємодія, сила тяжіння, граничні сили DEM.

У результаті моделювання процесу змішування компостної суміші однобарабанним лопатевим робочим органом встановлені залежності висоти H і ширини L сформованого бурта від частоти обертання n , лінійної швидкості переміщення робочого органу V , кута нахилу лопаті ξ . Складено математичний вираз у вигляді рівнянь регресії другого порядку, який зв'язав коефіцієнт варіації якості змішування δ із факторами досліджень. Вирішуючи компромісну задачу в програмному пакеті Wolfram Cloud отримуємо



раціональні параметри робочого органу: частоти обертання $n = 237$ об/хв, лінійної швидкості переміщення $V = 0,15$ м/с, кута нахилу лопаті $\xi = 15,8^\circ$. При цьому коефіцієнт варіації якості змішування $\delta = 0,51$, ширина сформованого бурту $L' = 1,23$ м і висота сформованого бурту $H' = 1,54$ м.

Ключові слова: компостна суміш, бурт, аератор, параметри, лопать, кут, швидкість, частота обертання, якість змішування, висота, довжина.

Вступ Технічне забезпечення механізованого компостування можна розділити на три групи технічних засобів [1, 2, 3, 4]: технічні засоби загального призначення, навантажувачі або перевантажувачі, мобільні аератори-змішувачі. Перша група включає навантажувачі періодичної дії, бульдозери та розкидачі органічних добрив. Механізований процес забезпечує технологічні вимоги щодо висоти та ширини буртів. Але інформація про якісні характеристики створюваних сумішей і умови ферментації в науково-технічній літературі недостатньо для прийняття практичних рішень. Загальний недолік комплексу машин – високі експлуатаційні затрати. Друга група включає навантажувачі неперервної дії з боковим або прямо-потоким перевантаженням. Перевага засобів – висока продуктивність процесу завантаження готової продукції, проведення аерації, переміщення і об'єднання буртів. Основний недолік – складність конструкції, висока енергоємність процесу і, як наслідок, низька економічна ефективність. Третя група – мобільні аератори-змішувачі, які забезпечують вивільнення вуглекислого газу з суміші, поповнення кисню, виконує механічне змішування компонентів і інгредієнтів суміші, проводить управління температурним середовищем в бурті. Основні переваги – висока продуктивність та простота конструкції. Недолік – потребує постійного коригування висоти бурту по кількості сировини.

Найбільше розповсюдження отримали мобільні аератори-змішувачі роторно-барабанного типу. Однак для обґрунтування параметрів робочих органів розпушування компостів та формування буртів на даний час недостатньо інформації. Аератори-змішувачі різняться по виконанню технологічної схеми роботи, типу робочого органу, джерела енергії, конструкції робочого вікна, допоміжного обладнання [5, 6].

В результаті пошукових виробничих випробувань [7, 8] встановлено, що недолік в роботі аератора-змішувача в механізованій технології виробництва компостів – необхідність попередньої (первинної) підготовки бурту по висоті і ширині захвату робочого вікна та погодження із швидкісними режимами роботи енергозасобу. Використання додаткових технічних засобів для покращення

технологічності роботи аератора приводить до збільшення експлуатаційних затрат.

Узагальнюючі дані по аналізу конструкцій технічного забезпечення механізованого компостування, проведених попередніх теоретичних і експериментальних досліджень відомих науковців [9, 10, 11], власних пошукових досліджень [12, 13] встановлено, що механізоване виробництво компостів потребує додаткового вивчення. Так, аналіз показав, що ефективними є роторні барабанно-лопатеві робочі органи. Однак, недостатньо досліджені залежності зміни висоти бурту при формуванні, показники однорідності і структурності суміші, енергоємності при роботі барабанно-лопатевих робочих органів від частоти обертання, швидкості переміщення робочого органу і геометричних параметрів лопатей. Не досліджені зміни об'ємної маси, структурності суміші, пошарового розподілу температури в бурті під дією робочих органів.

Відсутні рекомендації для вибору раціональних параметрів робочих органів за умови економії енерговитрат на підготовку, змішування, розпушування, формування сумішей в бурт. Систематизація положень про механізовані способи виробництва компостів, раціональні параметри робочих органів дозволить зменшити експлуатаційні витрати, а технології доступними для практичного використання.

Це обумовлювало актуальність проведення досліджень згідно вибраного напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технічне забезпечення

механізованого компостування можна розділити на три групи технічних засобів [1, 2, 3, 4]: технічні засоби загального призначення, навантажувачі або перевантажувачі, мобільні аератори-змішувачі. Перша група включає навантажувачі періодичної дії, бульдозери та розкидачі органічних добрив. Механізований процес забезпечує технологічні вимоги щодо висоти та ширини буртів. Але інформація про якісні характеристики створюваних сумішей і умови ферментації в науково-технічній літературі недостатньо для прийняття практичних рішень. Загальний недолік комплексу машин – високі експлуатаційні



затрати. Друга група включає навантажувачі неперервної дії з боковим або прямо-потоким перевантаженням. Перевага засобів – висока продуктивність процесу завантаження готової продукції, проведення аерації, переміщення і об'єднання буртів. Основний недолік – складність конструкції, висока енергоємність процесу і, як наслідок, низька економічна ефективність. Третя група – мобільні аератори-змішувачі, які забезпечують вивільнення вуглекислого газу з суміші, поповнення кисню, виконує механічне змішування компонентів і інгредієнтів суміші, проводить управління температурним середовищем в бурті. Основні переваги - висока продуктивність та простота конструкції. Недолік – потребує постійного коригування висоти бурту по кількості сировини.

Найбільше розповсюдження отримали мобільні аератори-змішувачі роторно-барабанного типу. Однак для обґрунтування параметрів робочих органів розпушування компостів та формування буртів на даний час недостатньо інформації. Аератори-змішувачі різняться по виконанню технологічної схеми роботи, типу робочого органу, джерела енергії, конструкції робочого вікна, допоміжного обладнання [5, 6].

В результаті пошукових виробничих випробувань [7, 8] встановлено, що недолік в роботі аератора-змішувача в механізованій технології виробництва компостів – необхідність попередньої (первинної) підготовки бурту по висоті і ширині захвату робочого вікна та погодження із швидкісними режимами роботи енергозасобу. Використання додаткових технічних засобів для покращення технологічності роботи аератора приводить до збільшення експлуатаційних затрат.

Узагальнюючі дані по аналізу конструкцій технічного забезпечення механізованого компостування, проведених попередніх теоретичних і експериментальних досліджень відомих науковців [9, 10, 11], власних пошукових досліджень [12, 13] встановлено, що механізоване виробництво компостів потребує додаткового вивчення. Так, аналіз показав, що ефективними є роторні барабанно-лопатеві робочі органи. Однак, недостатньо досліджені залежності зміни висоти бурту при формуванні, показники однорідності і структурності суміші, енергоємності при роботі барабанно-лопатевих робочих органів від частоти обертання, швидкості переміщення робочого органу і геометричних параметрів лопатей. Не досліджені зміни об'ємної маси, структурності суміші, пошарового розподілу температури в бурті під дією робочих органів.

Відсутні рекомендації для вибору раціональних параметрів робочих органів за

умови економії енерговитрат на підготовку, змішування, розпушування, формування сумішей в бурті. Систематизація положень про механізовані способи виробництва компостів, раціональні параметри робочих органів дозволить зменшити експлуатаційні витрати, а технології доступними для практичного використання.

Це обумовлювало актуальність проведення досліджень згідно вибраного напрямку.

Мета та завдання дослідження. За результатами чисельного моделювання технологічного процесу формування бурта і змішування компонентів компостної суміші провести обґрунтування конструктивно-режимних параметрів робочого органу однобарабанного аератора..

Виклад основного матеріалу. В якості інструменту для чисельного моделювання використано програмний пакет Simcenter Star-CCM+. Для побудови фізико-математичної моделі процесів змішування компостної суміші і формування бурта використані наступні сіткові і фізичні моделі: безсіткова DEM (Discrete element method) інтерполяція рішення, Лагранжева багатофазність, нестационарний неявний, модель дискретних елементів DEM, багатофазна взаємодія, сила тяжіння, граничні сили DEM.

В якості Лагранжевої фаза задано частинки компосту з наступними моделями: частинка DEM, сферичні частинки, суцільна, постійна щільність, час існування. В якості фазової взаємодії частинки-частинки обрані наступні моделі: фазова взаємодія DEM, Герца-Міндліна, опір кочення, лінійне зчеплення. В якості фазової взаємодії частинка-стінка обрані наступні моделі: фазова взаємодія DEM, Герца-Міндліна, опір кочення.

Задано дві області: область формування бурта і область робочого органу. Для області формування бурта обрано область частинок. Для області робочого органу обрано область твердого тіла.

Для формування вихідного бурта обрано інжектор частинок, який має тип випадкового інжектора на область формування бурта. Умова упаковки частинок – лічильник частинок. Діаметр зерна приймаємо 0,0025 м.

Під час моделювання компостної суміші використовуються наступні параметри вирішувача: крок за часом – 0,01 с. Для зупинки моделювання задано критерій – максимальний фізичний час – 100 с.

На початковому етапі моделювання задаються початкові положення частинок компостної суміші. Після цього, з врахуванням фізичних законів контактної взаємодії,



обчислюються сили, що діють на кожну частинку протягом кожного інтервалу часу. Для кожної частинки обчислюється результуюча сила, що дозволяє вирішувати задачу Коші протягом вибраного відрізка часу. Це отримані початкові дані стають вихідними для наступного кроку моделювання.

Для чисельного моделювання складено розрахункову схему, яка приведена на рис. 1, а. Вид зверху представлено на рис. 1, б, а вид ззаду – на рис. 1, в. Моделювання було проведено у тривимірному просторі. В процесі моделювання розглянуто половину бурту і робочого органу. Бічна стінка (виділена червоним) є дзеркальною площиною симетрії. Бурт компостної суміші має наступні параметри: ширина $L = 2$ м, висота $H = 1,5$ м.

За перерізом бурта виділено 10 горизонтальних зон, які відображається різними кольорами.

Враховуючи попередні дослідження [12, 13], прийнято ряд конструктивних параметрів робочого органу, які наведені в табл. 1.

В якості факторів моделювання обрані наступні конструктивні і технологічні параметри: кут нахилу лопаті ζ , частота обертання барабану n , лінійна швидкість переміщення робочого органу V (межі варіювання факторів наведені в табл. 2). Кут нахилу лопаті ζ приймався рівним 10° , 20° , 30° . Загальний вигляд розташування лопатей приведено на рис. 2. Моделювання було проведено з використанням повного факторного дослідження. Загальна кількість дослідів складає 27.

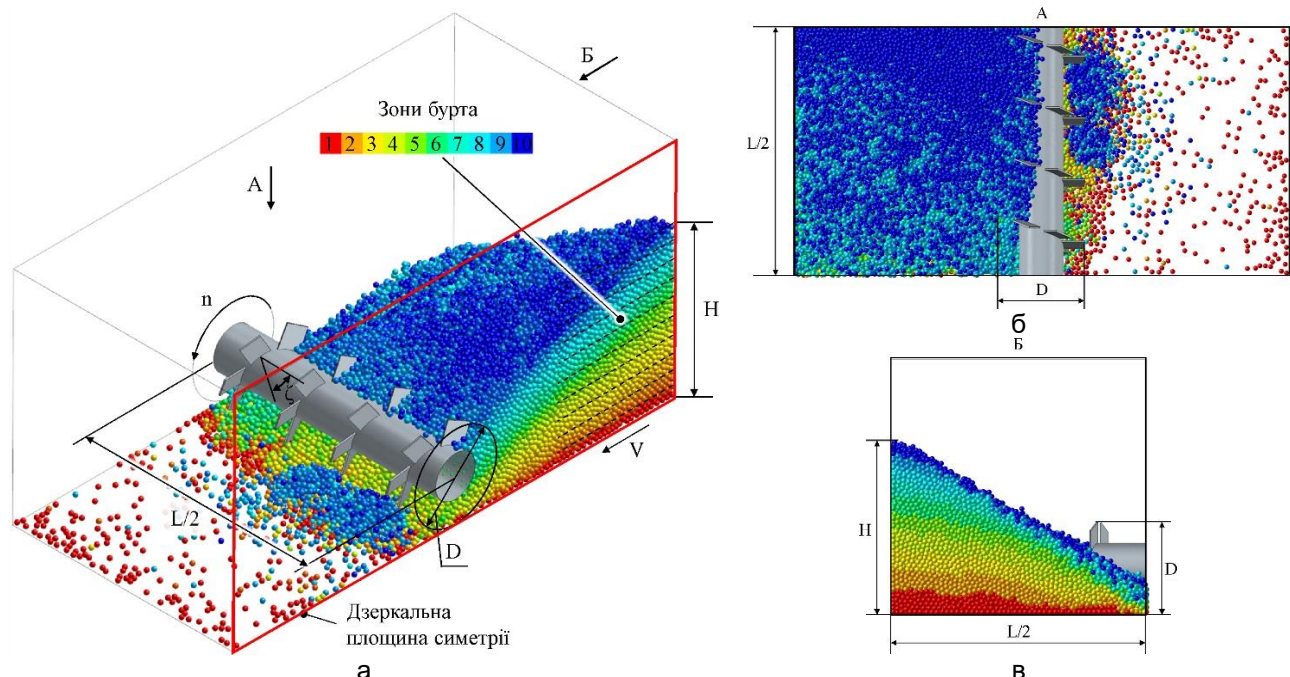


Рис. 1. Розрахункова схема моделювання однобарабанного лопатевого робочого органу в тривимірному просторі

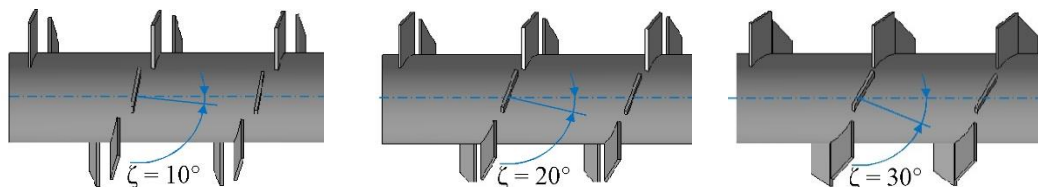


Рис. 2. Загальний вигляд розташування лопатей лопатевого робочого органу аератора

Таблиця 1

Конструктивні параметри однобарабанного робочого органу аератора

Величина	Значення
Радіус робочого органу з урахування лопатей, м	0,2
Радіус валу, м	0,05
Товщина лопатей, м	0,004
Висота розміщення робочого органу, м	0,22



Таблиця 2

Рівні варіацій факторами моделювання процесу змішування компостної суміші
однобарабаним лопатевим робочим органом

Рівні	Фактори		
	Кут нахилу лопаті $\zeta, ^\circ$	Частота обертання $n, \text{об/хв}$	Лінійна швидкість руху $V, \text{м/с}$
- 1	10	200	0,05
0	20	400	0,15
+ 1	30	600	0,25
Δ	10	200	0,1

Для вивчення впливу кожного з факторів на критерій оптимізації процесу та встановлення оптимальних параметрів технічних засобів, використано методику математичного планування багатфакторного експерименту. Ця методику дозволяє створити математичні моделі робочих процесів у формі рівнянь регресії другого порядку (полінома). Її використання дозволило отримати інформацію про те, як кожен з факторів впливає на визначений критерій оптимізації процесу, а також встановити оптимальні значення параметрів для технічних засобів. Значимість коефіцієнтів регресій перевірялось з використанням критерію Стюдента.

У якості критерію моделювання було

прийнято висоту H' та довжину L' отриманого бурту компостної суміші і якість її змішування δ , яка визначалася коефіцієнтом варіації

$$\delta = 1 - \frac{1}{\bar{C}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}} \quad (1)$$

де \bar{C} – середнє значення концентрації матеріалу в бурті; C_i – концентрація матеріалу в i -ої зоні бурта; n – кількість зон в бурті.

В результаті симуляції отримано візуалізацію технологічного процесу змішування компостної суміші і формування бурта (рис. 3).

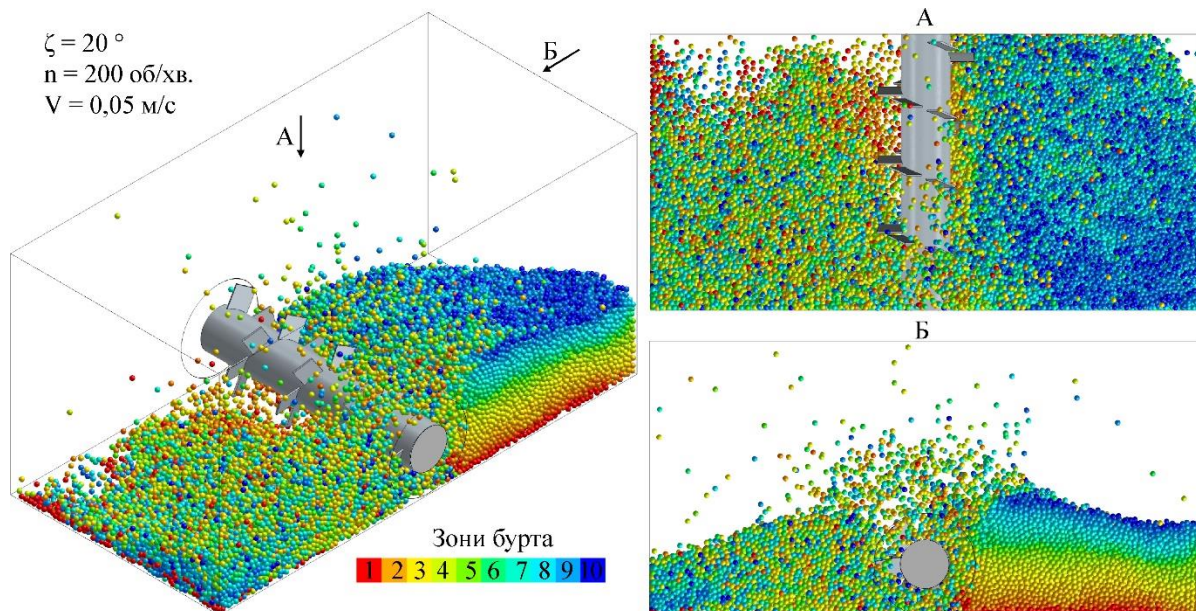


Рис. 3. Візуалізація чисельного моделювання технологічного процесу змішування компостної суміші і формування бурта

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud проведено апроксимацію отриманих даних, в результаті якої встановлено рівняння залежності в розкодованому вигляді без не значущих коефіцієнтів висоти сформованого бурта від факторів досліджень:

$$H' = 1,01115 - 0,000710263 n +$$

$$1,04421 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,0260507 \xi - 0,0000259445 n \xi - 0,00033 \xi^2 + 2,27408 V - 0,00058875 n V + 0,0179583 \xi V + 1,95907 V^2. \quad (2)$$

Графічна інтерпретація залежності (2) представлена на рис. 4, а. Аналізуючи рис. 4, а можна зробити висновок про те, що із



збільшенням кута нахилу лопаті ξ збільшується і висота сформованого бурту і наближається до максимального значення $H = 2,03$ м.

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud проведено апроксимацію отриманих даних, в результаті якої встановлено рівняння залежності ширини сформованого бурта від факторів досліджень в розкодованому вигляді без не значущих коефіцієнтів

$$L = 1,16421 + 0,0000888882 n + 3,77096 \cdot 10^{-7} n^2 - 0,014427 \xi - 0,0000216031 n u + 0,00124326 u^2 - 1,51279 V - 0,000958459 n V + 0,0909097 u V + 3,16057 V^2. \quad (3)$$

Графічна інтерпретація залежності (3) представлена на рис. 4, б. Аналізуючи рис. 4, б, можна зробити висновок про те, що із збільшенням кута нахилу лопаті ξ збільшується і ширина сформованого бурту.

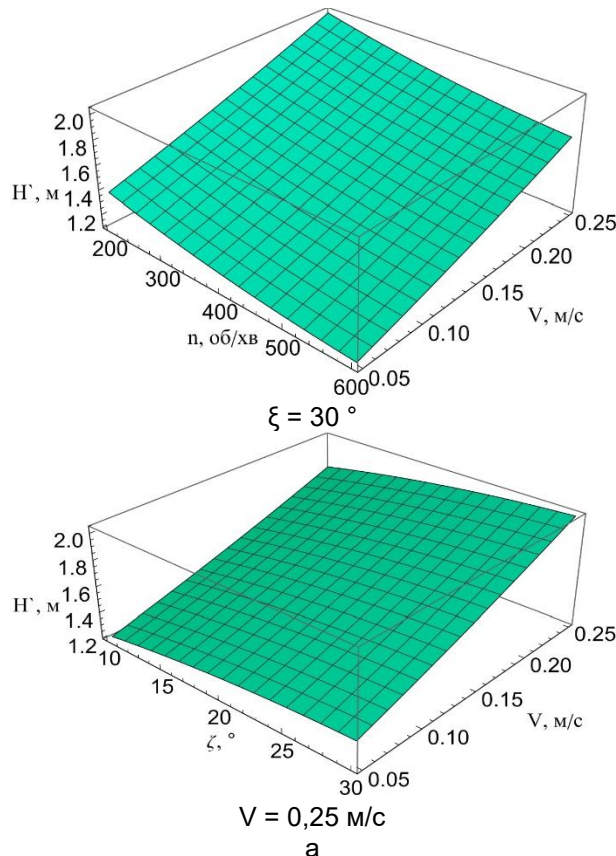


Рис. 4. Залежність висоти H (а) і ширини (L) сформованого бурту від частоти обертання n , лінійної швидкості переміщення робочого органу V , кута нахилу лопаті ξ

Застосування апроксимації отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволило встановити рівняння, що виражає залежність коефіцієнта варіації якості змішування у декодованому вигляді, при цьому виключивши незначущі коефіцієнти від факторів дослідження

$$\delta = 0,553673 - 0,00198863 n + 1,5495 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,00166465 \xi - 2,97987 \cdot 10^{-6} n \xi - 0,0000211111 \xi^2 + 1,62279 V + 0,00142603 n V - 0,0129027 \xi V + 3,02957 V^2. \quad (4)$$

Графічна інтерпретація залежності (4) представлена на рис. 5. Аналіз рис. 5 і рівняння (4) показує, що кут нахилу лопаті практично не впливає на коефіцієнт варіації якості змішування.

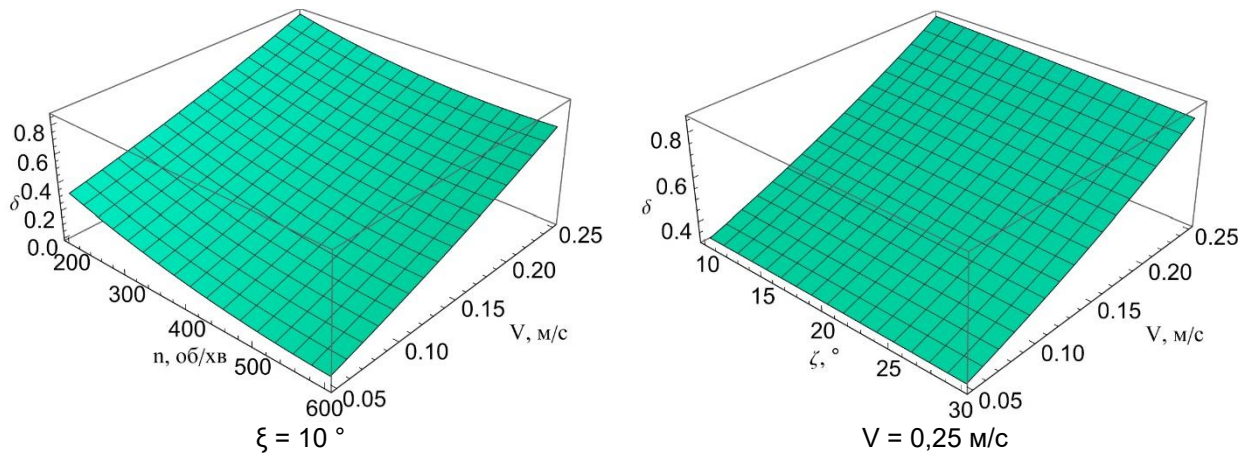
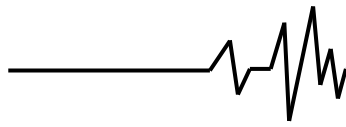


Рис. 5. Залежність коефіцієнта варіації якості змішування δ від частоти обертання n , лінійної швидкості переміщення робочого органу V , кута нахилу лопаті ξ

Вирішуючи компромісну задачу, яка зводиться до мінімізації коефіцієнта варіації якості змішування δ при найменшому значенні ширини сформованого бурту L' і найбільшому значенні висоти сформованого бурту H' :

$$\begin{cases} H(\xi, n, V) \rightarrow \max, \\ L'(\xi, n, V) \rightarrow \min, \\ \delta(\xi, n, V) \rightarrow \min. \end{cases} \Rightarrow \frac{\delta(\xi, n, V) \cdot L'(\xi, n, V)}{H(\xi, n, V)} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Вирішуючи компромісну задачу в програмному пакеті Wolfram Cloud, отримуємо раціональні параметри робочого органу: частоти обертання $n = 237$ об/хв, лінійної швидкості переміщення $V = 0,15$ м/с, кута нахилу лопаті $\xi = 15,8^\circ$. При цьому коефіцієнт варіації якості змішування $\delta = 0,51$, ширина сформованого бурту $L' = 1,23$ м і висота сформованого бурту $H' = 1,54$ м.

Висновки. У результаті моделювання процесу змішування компостної суміші однобарабаним лопатевим робочим органом встановлені залежності висоти H' і ширини L' сформованого бурта від частоти обертання n , лінійної швидкості переміщення робочого органу V , кута нахилу лопаті ξ . Складено математичний вираз у вигляді рівнянь регресії другого порядку, який зв'язав коефіцієнт варіації якості змішування δ із факторами досліджень. Вирішуючи компромісну задачу в програмному пакеті Wolfram Cloud, отримуємо раціональні параметри робочого органу: частоти обертання $n = 237$ об/хв, лінійної швидкості переміщення $V = 0,15$ м/с, кута нахилу лопаті $\xi = 15,8^\circ$. При цьому коефіцієнт варіації якості змішування $\delta = 0,51$, ширина сформованого бурту $L' = 1,23$ м і висота сформованого бурту $H' = 1,54$ м.

Список використаних джерел

1. Epstein E. Industrial Composting. Environmental Engineering and Facilities Management. CRC Press, 2011. 338 p. URL: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/24537/1/Industrial%20Composting-%20Environmental%20Engineering%20and%20Facilities%20Management%282011%29.pdf>
2. Li Z., Miito G. J., Lim T. T. Mixing-Vessel Composting System at a Large Swine Finishing Farm. Extension. University of Missouri. 2020. Vol. 12. P. 1–9. URL: <https://extension.missouri.edu/media/wysiwyg/Extensiondata/Pub/pdf/agguides/ansci/g03402.pdf>
3. Ляшенко О. О., Мовсесов Г. Є. Технологія прискореного біотермічного компостування гною з органічним вологопоглинальними відходами АПК. Рекомендації. Інститут механізації тваринництва УААН. Запоріжжя: IMT УААН. 2007. 32 с.
4. Siles-Castellano A. B., López-González J. A., Jurado M. M., Estrella-González M. J., Suárez-Estrella F., López M. J. Compost Quality and Sanitation on Industrial Scale Composting of Municipal Solid Waste and Sewage Sludge. Appl. Sci, 2021. Vol. 11. 7525. DOI: 10.3390/app11167525
5. Антонець С. С., Антонець А. С., Писаренко В. М. Органічне землеробство: з досвіду ПП «Агроекологія» Шишацького району Полтавської області: практ. рек. Полтава. 2010. 200 с.
6. Писаренко В. М., Писаренко П. В. Органічні добрива на захисті родючості ґрунту: монографія. Громадська спілка «Полтавське товариства сільського господарства». Полтава. 2022. 158 с.
7. Механіко-технологічні основи процесів виробництва органічної продукції рослинництва: монографія / Г. І. Голуб та ін. НУБіП Україна. 2017. 431 с.



8. Golub G., Pavlenko S., Kukharets S. Analytical research into the motion of organic mixture components during formation of compost clamps. *Eastern-European journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3/1 (87). P. 30–35.

9. Голуб Г. А. Агропромислове виробництво їстівних грибів. Механіко-технологічні основи: монографія: Київ. Аграрна наука. 2007. 332 с.

10. Шевченко І. А., Ляшенко О. О. Теоретичний аналіз впливу конструктивних і розмірних параметрів робочих органів на продуктивність компосту вальної машини. Зб. наук. праць «Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві» ІМТ УААН. 2008. Вип. 1(1). Р. 3–11.

11. Лінник М. К., Рубан Б. О. Шляхи вдосконалення технологій та технічних засобів переробки органічних відходів тваринництва та птахівництва в органічні добрива. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2011. Вип. 11 (5). С. 10–16.

12. Aliiev E., Pavlenko S., Aliieva O., Morhun O. Accelerated biothermal composting of manure-compost mixture. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*. 2021. Vol. XXXII (2). P. 169–181. DOI: 10.15159/jas.21.30

13. Aliiev E., Pavlenko S., Golub G., Bielka O. (2022). Research of mechanized process of organic waste composting. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*, 2022. Vol. XXXIII (1). P. 21–32. DOI: 10.15159/jas.22.04

14. Сенчук М. М. Технологічне проектування в органічному виробництві: Навчально-методичний посібник для самостійної роботи та практичних занять студентів агробіотехнологічного факультету. БНАУ. Біла Церква. 2020. 94 с.

15. Лінник М. К., Сенчук М. М. Технології і технічні засоби виробництва та використання органічних добрив: монографія. Ніжин. 2012. 248 с.

16. Шевченко І. А., Харитонов В. І., Алієв Е. Б. Результати експериментальних досліджень змішувача-аератора компостів. Зб. наук. праць ІМТ НААН «Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві». 2011. Вип. 2(8). С. 80–88.

17. Голуб Г. А. Модель барабанно-пальцевого розпушувача компосту з нахилом пальців. Механізація та електрифікація сільського господарства. Глеваха. 2005. Вип. 89. С. 212–219.

18. Шевченко І. А., Ковязін О. С., Харитонов В. І. Механіко-математична модель процесу розвантаження барабанного органу для змішування компостних матеріалів та механічної аерації. Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві.

Збірник наукових праць інституту механізації тваринництва УААН. 2010. Вип. 1 (5, 6). С. 248–265.

References

1. Epstein, E. (2011). *Industrial Composting. Environmental Engineering and Facilities Management*. CRC Press, 338 p. Retrieved from: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/24537/1/Industrial%20Composting-%20Environmental%20Engineering%20and%20Facilities%20Management%202011%29.pdf>

2. Li, Z., Miito, G. J., Lim T. T. (2020). Mixing-Vessel Composting System at a Large Swine Finishing Farm. *Extension. University of Missouri*. 12, 1–9. Retrieved from: <https://extension.missouri.edu/media/wysiwyg/Extensiondata/Pub/pdf/agguides/ansci/g03402.pdf>

3. Lyashenko, O. O., Movsesov, H. YE. (2007). *Tekhnolohiya pryskorenoho biotermichnoho kompostuvahhya hnoyu z orhanichnym voloho pohlynal'nymy vidkhodamy APK. Rekomendatsiyi. [Technology of accelerated biothermal composting of manure with organic moisture-absorbing agricultural waste. Recommendations]*. Instytut mekhanizatsiyi tvarynnystvva UAAN. Zaporizhzhya: IMT UAAN, 32 p. [in Ukrainian].

4. Siles-Castellano, A. B., López-González, J. A., Jurado, M. M., Estrella-González, M. J., Suárez-Estrella, F., López, M. J. (2021). Compost Quality and Sanitation on Industrial Scale Composting of Municipal Solid Waste and Sewage Sludge. *Appl. Sci*, 11, 7525. DOI: 10.3390/app11167525

5. Bondarenko, A. M., Kachanova L. S. (2016). *Tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva proizvodstva i primeneniya organicheskikh udobreniy: monografiya. [Technologies and technical means of production and use of organic fertilizers: monograph]*. Zernograd: Azovo-Chernomorskiy inzhenernyy institut FGBOU VO Donskoy GAU. 224 p. [in Russian].

6. Khmyrov, V. D., Kudenko, V. B. (2011). *Sovershenstvovaniye sredstv mekhanizatsii uborki navoza glubokoy podstilki: monografiya [Improving the means of mechanization of deep litter manure cleaning: monograph]*. Michurinsk – naukograd RF. 125 p. [in Russian].

7. Holub, H. I., Kukharets', S. M., Marus, O. A., Pavlenko, S. I., Lopat'ko, K. H., Skorobohatov, D. V. (2017). *Mekhaniko-tekhnolohichni osnovy protsesiv vyrobnystvva orhanichnoyi produktsiyi roslynnystvva. Monohrafiya. [Mechanical and technological bases of production processes of organic products of crop production.]*. NUBiP Ukrayina. 431 p. [in



Ukrainian].

8. Golub, G., Pavlenko, S., Kukharets, S. (2017). Analytical research into the motion of organic mixture components during formation of compost clumps. *Eastern-European journal of Enterprise Technologies*, 3/1 (87), 30–35.

9. Holub, H. A. (2007). *Ahropromyslove vyrobnytstvo yistivnykh hrybiv. Mekhaniko-tekhnologichni osnovy: monohrafiya. [Agro-industrial production of edible mushrooms. Mechanical and technological basics: monograph]*. Kyiv. Ahrarna nauka. 332 p. [in Ukrainian].

10. Shevchenko, I. A., Lyashenko, O. O. (2008). Teoretychnyy analiz vplyvu konstruktyvnykh i rozmirnykh parametriv robochykh orhaniv na produktyvnist' kompostu val'noyi mashyny. *Zb. nauk. prats' «Mekhanizatsiya, ekolohizatsiya ta konvertatsiya biosyrovyny u tvarynnytstvi»*. [Coll. of science works «Mechanization, environmentalization and conversion of bio-raw materials in animal husbandry»]. IMT UAAN, 1(1), 3–11. [in Ukrainian].

11. Linnyk, M. K., Ruban, B. O. (2011). Shlyakhy vdoskonalennya tekhnolohiy ta tekhnichnykh zasobiv pererobky orhanichnykh vidkhodiv tvarynnytstva ta ptakhivnytstva v orhanichni dobryva. *Pratsi Tavriys'koho derzhavnogo ahrotekhnologichnoho universytetu [Proceedings of the Tavri State Agricultural Technological University]*, 11 (5), 10–16. [in Ukrainian].

12. Aliiev, E., Pavlenko, S., Aliieva, O., Morhun, O. (2021). Accelerated biothermal composting of manure-compost mixture. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*, XXXII (2), 169–181. DOI: 10.15159/jas.21.30

13. Aliiev, E., Pavlenko, S., Golub, G., Bielka, O. (2022). Research of mechanized process of organic waste composting. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*, 2022, XXXIII (1), 21–32. DOI: 10.15159/jas.22.04

14. Senchuk M. M. (2020). *Tekhnologichne proektuvannia v orhanichnomu vyrobnytstvi: Navchalno-metodychnyi posibnyk dlia samostiinoi roboty ta praktychnykh zaniat studentiv ahrobiotekhnologichnoho fakultetu [Technological design in organic production: Educational and methodological guide for independent work and practical classes of students of the Faculty of Agro-Biotechnology]*. BNAU. Bila Tserkva. 94 s. [in Ukrainian].

15. Linnyk M. K., Senchuk M. M. (2012). *Tekhnolohii i tekhnichni zasoby vyrobnytstva ta vykorystannia orhanichnykh dobryv: monohrafiia [Technologies and technical means of production and use of organic fertilizers: monograph]*. Nizhyn. 248 s. [in Ukrainian].

16. Shevchenko I. A., Kharytonov V. I., Aliiev E. B. (2011). *Rezultaty eksperymentalnykh*

doslidzen zmishuvacha-aeratora kompostiv [Results of experimental studies of compost mixer-aerator]. *Zb. nauk. prats IMT NAAN «Mekhanizatsiia, ekolohizatsiia ta konvertatsiia biosyrovyny u tvarynnytstvi»*, 2(8): 80–88. [in Ukrainian].

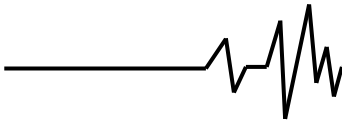
17. Holub, H. A. (2005). Model' barabanno-pal'tsevoho rozpushuvacha kompostu z nakhylom pal'tsiv. *Mekhanizatsiya ta elektryfikatsiya sil's'koho hospodarstva [Mechanization and electrification of agriculture]*. Hlevakha, 89, 212–219. [in Ukrainian].

18. Shevchenko, I. A., Kovyazin, O. S., Kharytonov, V. I. (2010). Mekhaniko-matematychna model' protsesu rozvantazhennya barabannoho orhanu dlya zmishuvannya kompostnykh materialiv ta mekhanichnoyi aeratsiyi. *Mekhanizatsiya, ekolohizatsiya ta konvertatsiya biosyrovyny u tvarynnytstvi. Zbirnyk naukovykh prats' instytutu mekhanizatsiyi tvarynnytstva UAAN [Mechanization, environmentalization and conversion of bio-raw materials in animal husbandry. Collection of Scientific Works of the Institute of Livestock Mechanization of the Ukrainian Academy of Sciences]*, 1 (5, 6), 248–265. [in Ukrainian].

SIMULATION OF THE PROCESS OF FORMING THE EDGE AND MIXING THE COMPONENTS OF THE COMPOST MIXTURE WITH A SINGLE-DRUMMED AERATOR

The most widespread approach for implementing the technological process of organic compost production involves using mobile aerator-mixers of the rotary-drum type. Based on the analysis of various designs of mechanized composting equipment from previous theoretical and experimental studies conducted by renowned scientists, as well as our own research, it has been established that mechanized compost production requires further investigation. The analysis revealed that rotary drum-blade working elements are efficient. However, there is insufficient research on the dependencies of changes in the height of the pile during formation, indicators of homogeneity and structure of the mixture, energy consumption during the operation of drum-blade working elements in relation to the rotation frequency, working element's linear velocity, and geometric parameters of the blades. Additionally, changes in the bulk density, mixture structure, and temperature distribution within the pile under the influence of the working elements have not been investigated. This highlights the relevance of conducting research in the chosen direction.

The analysis of developed models for the interaction of the working element with the compost mixture has shown that they cannot be



used to assess the quality of mixing and pile formation, as it is necessary to consider the movement of discrete particles that make up the compost mixture. The mathematical description of the movement of discrete elements is achievable using modern CAE (Computer-Aided Engineering) systems, and one such system is Simcenter Star-CCM+.

Through numerical simulation of the technological process of pile formation and mixture mixing, an argumentation of the constructive and technological parameters of the working element of a single-drum aerator was conducted.

To construct the physical-mathematical model of the compost mixing and pile formation processes, the following mesh and physical models were utilized: meshless DEM (Discrete Element Method), solution interpolation, Lagrangian multiphase, unsteady implicit, DEM, multiphase interaction, gravity force, and boundary forces of DEM.

As a result of simulating the compost

mixture mixing process using a single-drum blade working element, dependencies of the height (H') and width (L') of the formed pile on the rotation frequency (n), linear velocity of the working element (V), and the blade's inclination angle (ξ) were established. A mathematical expression in the form of second-order regression equations was derived, linking the coefficient of variation of mixing quality (δ) with the research factors. Solving the compromise problem using the Wolfram Cloud software package allowed us to determine the rational parameters for the working element: rotation frequency (n) of 237 rpm, linear velocity (V) of 0.15 m/s, and blade inclination angle (ξ) of 15.8°. Consequently, the coefficient of variation of mixing quality (δ) was found to be 0.51, and the width (L') and height (H') of the formed pile were 1.23 m and 1.54 m, respectively.

Key words: compost mixture, edge, aerator, parameters, blade, angle, speed, rotation frequency, quality of mixing, height, length.

Відомості про авторів

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

Павленко Сергій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник Національного університету біоресурсів і природокористування України (вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна, 03041, e-mail: si.pavlenko17@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3352-5797>)

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

Sergey Pavlenko – Ph.D., associate professor, senior research fellow of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна, 03041, e-mail: si.pavlenko17@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3352-5797>).