

УДК 631.3:636

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МЕХАНІЧНОГО ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ КОМПОСТНОЇ СУМІШІ

Г. А. Голуб, д.т.н., професор, завідувач кафедри механізації тваринництва

С. І. Павленко, к.т.н., доцент, старший науковий співробітник:

e-mail: life-is-life.08@mail.ru; тел.: +380 (67) 562-89-27

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Мета. Дослідити процес механічного змішування компонентів компостної суміші, розробити його математичну модель.

Методи. Теоретичні дослідження проводилися із використанням механіко-математичного моделювання, положень теоретичної механіки і методів диференціального та інтегрального обчислення.

Результати. В результаті теоретичних досліджень механічного змішування компонентів компостної суміші з використанням програмного забезпечення Star CCM+, розроблена математична модель, яка включає систему залежностей ступеня зменшення бурта і коефіцієнта варіації змішування

від коефіцієнта завантаження, кінематичного показника режиму роботи.

Висновки. Встановлено, що при низькому значенні кінематичного показника режиму роботи ($\lambda = 16,8$) зі збільшенням коефіцієнта завантаження збільшується і коефіцієнт варіації. На відміну від високого значення кінематичного показника режиму роботи ($\lambda = 251,3$), при якому зі збільшенням коефіцієнта завантаження, коефіцієнт варіації зменшується.

Ключові слова: аератор, робочий орган, компостна суміш, математична модель, метод дискретних елементів, кінематичний показник, коефіцієнт завантаження, коефіцієнт варіації.

UDC 631.3:636

MATHEMATICAL MODELS OF MECHANICAL MIXING OF THE COMPONENTS COMPOST MIXTURE

G. A. Golub, Doctor of Engineering, Professor, Head of the department of animal husbandry mechanization

S. I. Pavlenko, PhD, Associate Professor, Senior Researcher

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

The purpose. Explore the process of mechanical mixing compost mixture and to develop its mathematical model.

Methods. Theoretical studies were carried out using mechanical and mathematical modeling, the provisions of theoretical mechanics and methods of differential and integral calculus.

Results. As a result of theoretical studies of the mechanical mixing compost mixture using software Star CCM + developed a mathematical model that includes a system of dependencies extent reduce shoulder and coefficient of variation of the

mixing ratio of the load index and the kinematic mode.

Conclusions. It is found that at low kinematic mode index ($\lambda = 16,8$) increases with increasing load factor and the coefficient of variation. In contrast to the high value of the kinematic parameter mode ($\lambda = 251,3$), wherein with increasing load factor variation coefficient decreases.

Keywords: aerator, working body, compost mixture, mathematical model, discrete element method, kinematic measure, the load factor, the coefficient of variation.

УДК 631.3:636

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЧЕСКОГО СМЕШИВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ КОМПОСТНОЙ СМЕСИ

Г. А. Голуб, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой механизации животноводства
 С. И. Павленко, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник
 Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

Цель. Исследовать процесс механического смешивания компонентов компостной смеси и разработать его математическую модель.

Методы. Теоретические исследования проводились с использованием механико-математического моделирования, положений теоретической механики и методов дифференциального и интегрального исчисления.

Результаты. В результате теоретических исследований механического смешивания компонентов компостной смеси с использованием программного обеспечения Star CCM+, разработана математическая модель, которая включает систему зависимостей степени уменьшения бурта и коэффициента вариации смешивания от коэффициента

загрузки и кинематического показателя режима работы.

Выводы. Установлено, что при низком значении кинематического показателя режима работы ($\lambda = 16,8$) с увеличением коэффициента загрузки увеличивается и коэффициент вариации. В отличие от высокого значения кинематического показателя режима работы ($\lambda = 251,3$), при котором с увеличением коэффициента загрузки, коэффициент вариации уменьшается.

Ключевые слова: аэратор, рабочий орган, компостная смесь, математическая модель, метод дискретных элементов, кинематический показатель, коэффициент загрузки, коэффициент вариации.

Проблема. У залежності від способу вивантаження гною на майданчик для компостування і його фізико-механічних властивостей, форму бурта компостної суміші, можна апроксимувати, як трикутну, трапецеїдальну і прямокутну. Трикутна і трапецеїдальна форма характеризується висотою H , шириною b і кутом природного ухилу

компостної суміші α (рис. 1). Прямокутна форма має місце при технології компостування в каналах. У зв'язку з різноманітністю форм та фізико-механічних властивостей гною необхідно мати певні типи робочих органів змішувачів-аераторів для здійснення технологічної операції компостування.

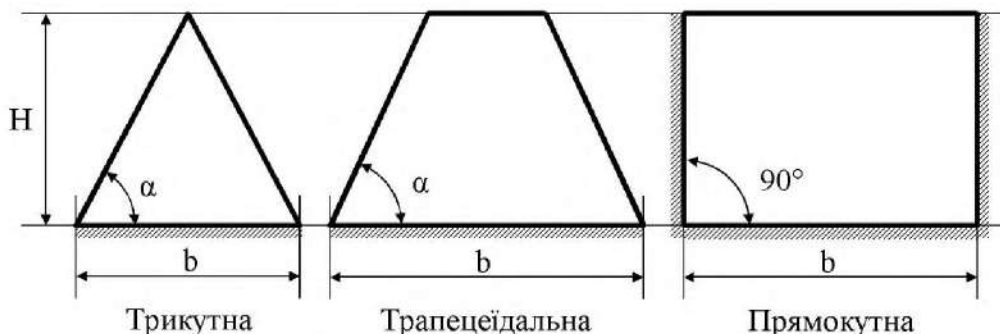


Рис. 1. Форми бурта компостної суміші
 Fig. 1. The compost mixture forms of clamp

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Конструкції робочих органів змішувачів-аераторів компостної суміші можна розділити на чотири типи в залежності від виду формованого бурта і фізико-меха-

нічних властивостей гною (рис. 2). Основними конструктивними елементами, яких складаються фрезерно-барабані робочі органи є барабан, лопаті похилі, лопаті прямі або гвинт. Прямі лопаті розташовані радіально по

центру барабана. Похилі лопаті встановлені симетрично, відносно центру барабана (відповідно симетрично, відносно прямих лопатей) і закріплені по гвинтових лініях навивки. Кут атаки похилих лопатей відмінний від кута гвинтової лінії.

Під час роботи фрезерно-барабанний робочий орган здійснює одночасно поступальний рух зі швидкістю v та обертальний рух зі швидкістю ω за рахунок цього, взаємодіє зі забуртованим компостним матеріалом. Похилі лопаті або гвинт, врізаючись в структуру компостного матеріалу, відокремлюють певну частину його й одночасно змішують, розпушують, пересувають і перекидають позаду барабана формуючи новий бурт. Прямі лопаті, які працюють у зоні найбільшої висоти бурту, виконують відокремлення матеріалу з масиву бурту, перекидають його з одноразовим формуванням нового бурта. Важливим параметром є наявність технологічно вільної зони за робочим органом, що обмежує можливість повторного перекидання компостної маси. Під час роботи як прямих, так і похилих лопатей (гвинта) в зоні польоту відокремлених часток, відбувається насичення суміші киснем і звітнення двоокису вугле-

цю, що утворився внаслідок мікробіологічних процесів. Перелопачування буртів, також супроводжується зниженням температури маси, звітненням вологи та інших газоподібних речовин.

Аналіз технологічних операцій, забезпечення механізованого процесу компостування органічних відходів, дозволив виділити дві функції: змішування компонентів та вирівнювання їх температури і формування бурта, органічної суміші заданої геометричної форми (рис. 3).

Однією з головних технологічних задач змішувача-аератора є механічне змішування компонентів компостної суміші та вирівнювання їх за температурою. Аналізуючи конструкцію робочого органу змішувача-аератора, необхідно підібрати математичну модель технологічного процесу змішування з типових моделей. Сам процес моделювання, може здійснюватися за допомогою різних підходів, а в дійсний час їх класифікація включає наступні методи [1]: емпіричні; аналіз структури потоків матеріалу за допомогою функції розподілення часу перебування часток; механіки суцільних середовищ; ентропійно-інформаційні; статистичні.

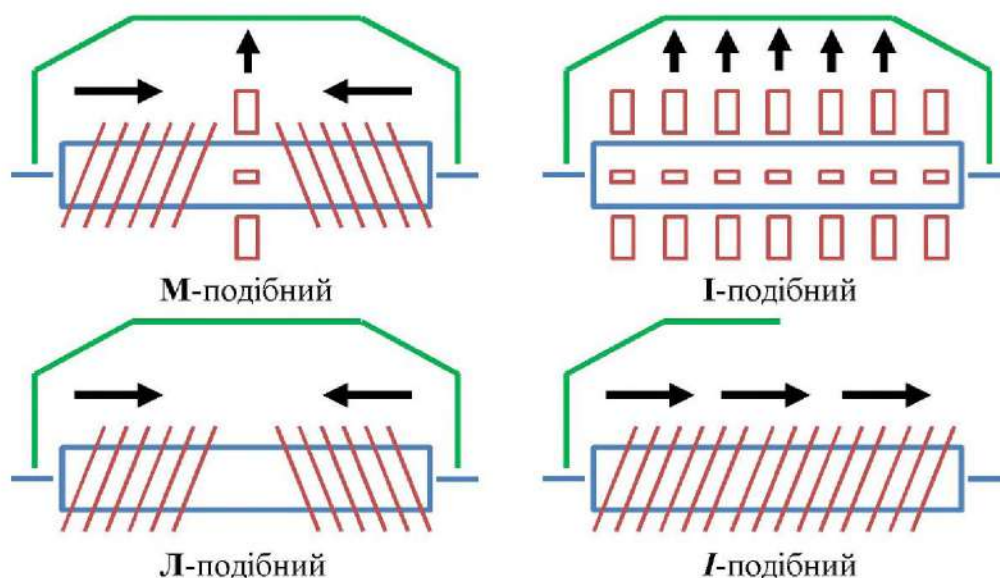


Рис. 2. Типи конструкцій робочих органів змішувачів-аераторів компостної суміші

Fig. 2. The types of construction workers mixers and aerators of compost mixture

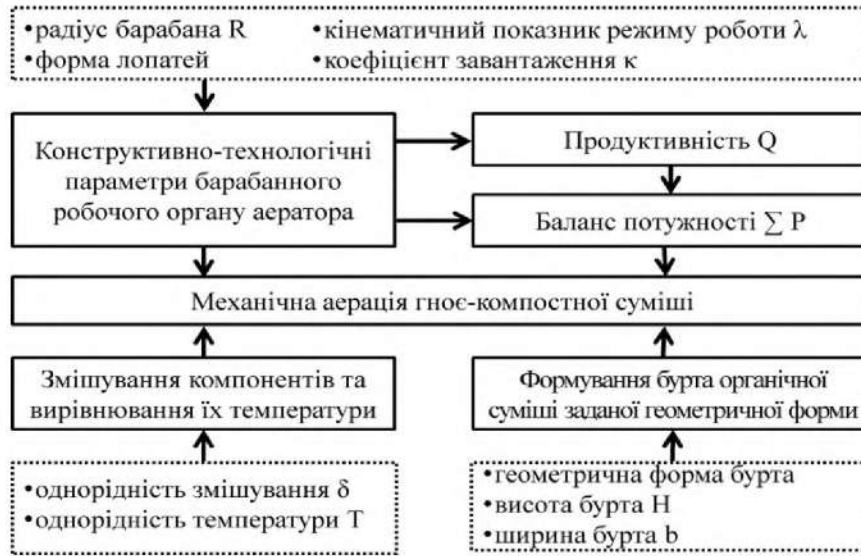


Рис. 3. Взаємозв'язок техніко-технологічних параметрів механізованого процесу компостування органічних відходів

Fig. 3. The relationship of technical and technological parameters of mechanized process of composting organic waste

Широке розповсюдження серед дослідників отримали наступні типові математичні моделі структури потоку матеріалу: моделі ідеального витиснення та ідеального змішування, дифузійна та комбінована моделі [2, 3]. Однак, процес змішування необхідно розглядати, як складну фізико-механічну систему.

Стратегія комплексного системного аналізу фізико-механічної системи передбачає, на початковому етапі, якісний аналіз [4]. При цьому, для процесу змішування виділяються два рівня ієрархії фізико-механічних ефектів і явищ, а саме сукупність фізико-механічних явищ в локальному обсязі (мікрорівень) та в обсязі всього апарату (макрорівень).

Під локальним для процесу змішування, розуміється, деякий елементарний об'єм, в якому міститься досить багато частинок дисперсних фаз. Структурна схема ефектів першого рівня ієрархії фізико-механічної системи для суміщеного процесу змішування-подрібнення, досить докладно розглянута в роботі [5], але вона може бути використана і при аналізі процесу змішування, після внесення відповідних змін. У цій роботі також зазначається, що при якісному аналізі структури процесу змішування, виділяються два аспекти: смисловий і математичний. В рамках

математичного аспекту, проведено якісний аналіз можливих математичних підходів, які можуть бути закладені в основу опису процесу змішування компостної суміші. Для змішувача-аератора можна записати наступний зв'язок між вхідними і вихідними параметрами [6]:

$$C(t)_{вих} = A(C(t)_{вх}), \quad (1)$$

де $C(t)_{вих}$ – миттєве значення концентрації ключового компонента в готовій суміші; $C(t)_{вх}$ – миттєве значення концентрації ключового компонента у вхідному потоці; A – оператор перетворення.

Мета досліджень. Дослідити процес механічного змішування компонентів компостної суміші та розробити його математичну модель.

Результати досліджень. Дифузійна модель процесу змішування компостної суміші відповідає потоку з поршнеvim рухом матеріалу при наявності поздовжнього і поперечного перемішування частинок. Основне рівняння має вигляд:

$$\frac{dC}{dt} = -v \frac{dC}{dx} + D_4 \frac{d^2C}{dx^2} + \frac{D_R}{R_{II}} \frac{d}{dR} \left(R \frac{dC}{dR} \right), \quad (2)$$

де C – концентрація ключового компонента; t – час; v – лінійна швидкість потоку; x – координата вздовж потоку; D_4 і D_R –

коефіцієнти подовжнього і поперечного перемішування (аналогі коефіцієнтів дифузії); $R_{\text{п}}$ – радіус поперечного перерізу потоку.

Приведене рівняння (2) для визначення концентрації ключового компонента в суміші, являється досить складним і не може бути вирішеним аналітичним способом. Тому, вирішення задачі перемішування компонентів компостної суміші проведемо з використанням комп'ютерного моделювання з використанням методу дискретних елементів [7, 8].

Метод динаміки частинок полягає у представленні середовища у вигляді сукупності взаємодіючих частинок – матеріальних точок або твердих тіл. Їх рух описується рівняннями класичної механіки. При моделюванні руху частинок за допомогою методу динаміки частинок на кожному кроці ітераційними методами, вирішується задача Коші – інтегруються диференціальні рівняння при заданих початкових умовах [9].

Метод дискретних елементів, може розглядатися, як узагальнення методу кінцевих елементів. При моделюванні процесу цим методом, задаються початкові положення і швидкість частинок. Потім, виходячи з цих початкових даних заданих фізичних законів взаємодії частинок, обчислюються сили, що діють на кожен частинку. Можна враховувати самі різні закони взаємодії; достатньо, щоб для їх опису існували розв'язні рівняння. Для кожної частки обчислюється результуюча сила, а також вирішується задача Коші на вибраному відрізку часу. У результаті виходять початкові дані для наступного кроку [10].

Метод дискретних елементів базується на законах збереження імпульсу і моменту імпульсу для моделей Лагранжа багатофазного середовища [11]. Однак для побудови фізико-математичної моделі необхідно прийняти припущення про те що частинки компонентів уявляються у вигляді кульок з визначеною густиною і ефективним діаметром.

Побудову фізико-математичної моделі процесу змішування компостної суміші робочим органом змішувача-аератора, виконаємо з використанням пакету програмного забезпечення Star CCM+. Компостна суміш представляється у вигляді сферичних частинок радіусом 2,5 мм. При моделюванні процесу, зазначеним методом задаються початкові положення частинок компостної суміші. Потім, виходячи з цих початкових даних заданих фізичних законів контактної взаємодії, обчислюються сили, що діють на кожен частинку в кожному інтервалі часу. Для кожної частинки, обчислюється результуюча сила, а також вирішується задача Коші на вибраному відрізку часу, результатом якої є початкові дані для наступного кроку. У якості фізичних моделей для чисельного моделювання були обрані наступні: поле сили тяжіння, модель дискретних елементів, Лагранжева багатофазність, модель багатофазної взаємодії [12].

Для реалізації чисельного моделювання було складено розрахункову схему процесу змішування компостної суміші лопатевим робочим органом (рис. 4).

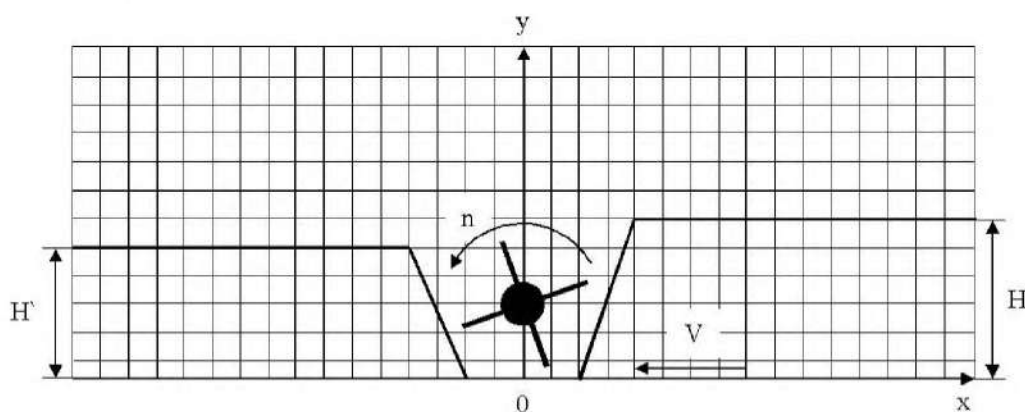


Рис. 4. Розрахункова схема процесу змішування компостної суміші лопатевим робочим органом

Fig. 4. The diagram the process of mixing compost mix by blade working body

Для чисельного моделювання процесу змішування компостної суміші лопатевим робочим органом, були прийняті конструктивно-технологічні параметри, які наведені в табл. 1. За фактори чисельного моделювання, були прийняті наступні конструктивно-технологічні параметри: частота обертання робочого органу n , лінійна швидкість переміщення робочого органу (або компостної суміші) V і висота вихідного бурта H (межі варіювання представлені в табл. 2).

Чисельне моделювання було проведено за повним факторним дослідом із загаль-

ною кількістю дослідів – $3^3 = 27$. В якості критерію, чисельного моделювання, була прийнята висота отриманого бурта компостної суміші і якість її змішування, яка визначалася коефіцієнтом варіації:

$$\delta = 1 - \frac{1}{\bar{C}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}}; \quad (3)$$

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

Таблиця 1. Конструктивно-технологічні параметри робочого органу змішувача-аератора

Table 1. Structural and technological parameters of the working body of the mixer-aerator

Величина	Позначення	Значення
Зовнішній радіус, м	R	0,2
Радіус валу, м	r	0,05
Товщина лопатей, м	δ	0,01
Висота розташування, м	h	0,22

Таблиця 2. Рівні варіацій факторами чисельного моделювання

Table 2. Levels of variations in factors of numerical simulation

Рівні варіацій факторів	Фактори		
	Частота обертання робочого органу n , об/хв.	Лінійна швидкість переміщення робочого органу (або компостної суміші) V , м/с	Висота вихідного бурта H_0 , м
Верхній рівень (+)	200	0,05	0,3
Основний рівень (0)	400	0,15	0,5
Нижній рівень (-)	600	0,25	0,7
Інтервал варіацій факторів	200	0,1	0,2

Слід зазначити, що бурт був поділений на 10 горизонтальних зон (рис. 5).

В результаті моделювання було отримано візуалізацію технологічного процесу змішування компостної суміші і формування бурта (рис. 6). Як видно з рис. 6, сформований бурт має меншу висоту на відміну від початкового бурта. Окрім цього візуально видно, що для кожного дослідів якість змішування відрізняється. На підставі цього можна проводити кількісну оцінку технологічного процесу змішування.

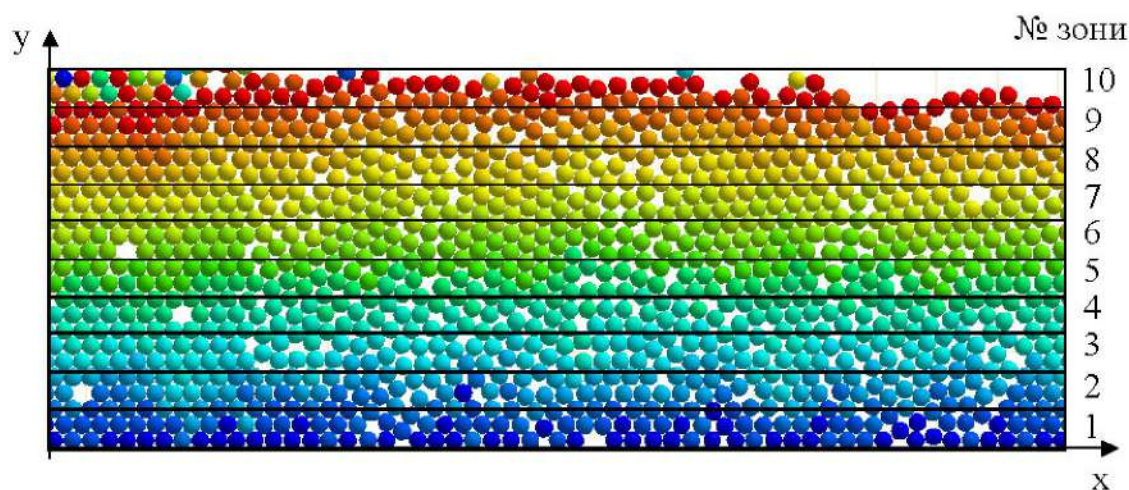


Рис. 5. Схема розміщення зон бурта
 Fig. 5. The diagram of placing of clamp zones

Ступінь зменшення висоти бурта після виконання технологічного процесу аерації визначається, як співвідношення висот бурта після та до змішування, за формулою:

$$\chi = \frac{H}{H_0}$$

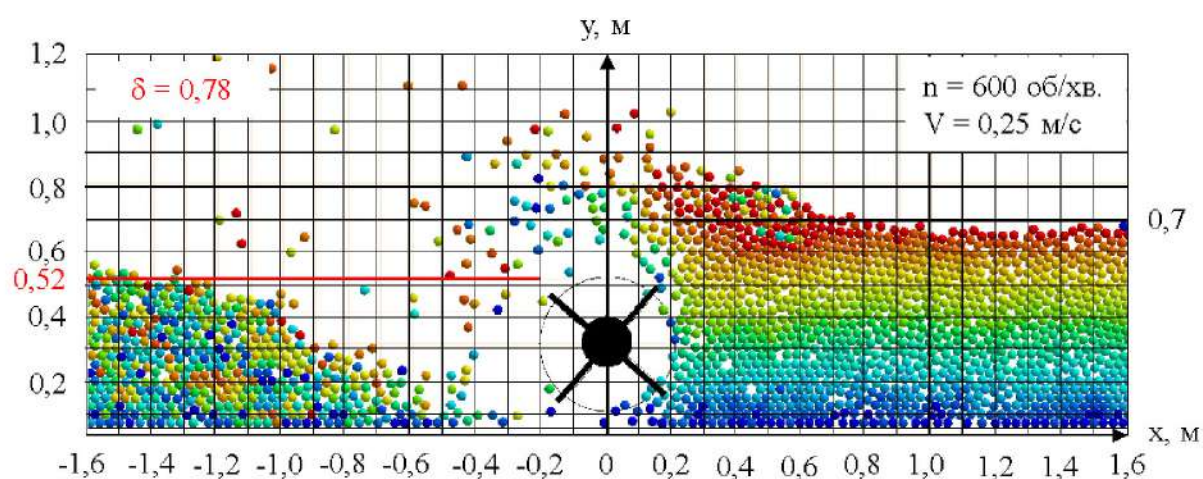


Рис. 6. Візуалізація технологічного процесу змішування компостної суміші і формування бурта
 Fig. 6. The visualization of the process of mixing compost mixture and forming clamp

З використанням програмного пакету Mathematica проведено апроксимацію отриманих даних, в результаті якої, встановлено рівняння залежності висоти сформованого бурта від факторів досліджень:

$$H = 0,268866 + 0,296528 H_0 + 0,319444 H_0^2 - 0,00103403 n - 0,000208333 H_0 n + 9,02778 \cdot 10^{-7} n^2 - 1,05417 V + 2,54167 H_0 V + 0,000125 n V + 0,944444 V^2. \quad (4)$$

Графічна інтерпретація залежності (4) представлена на рис. 7.

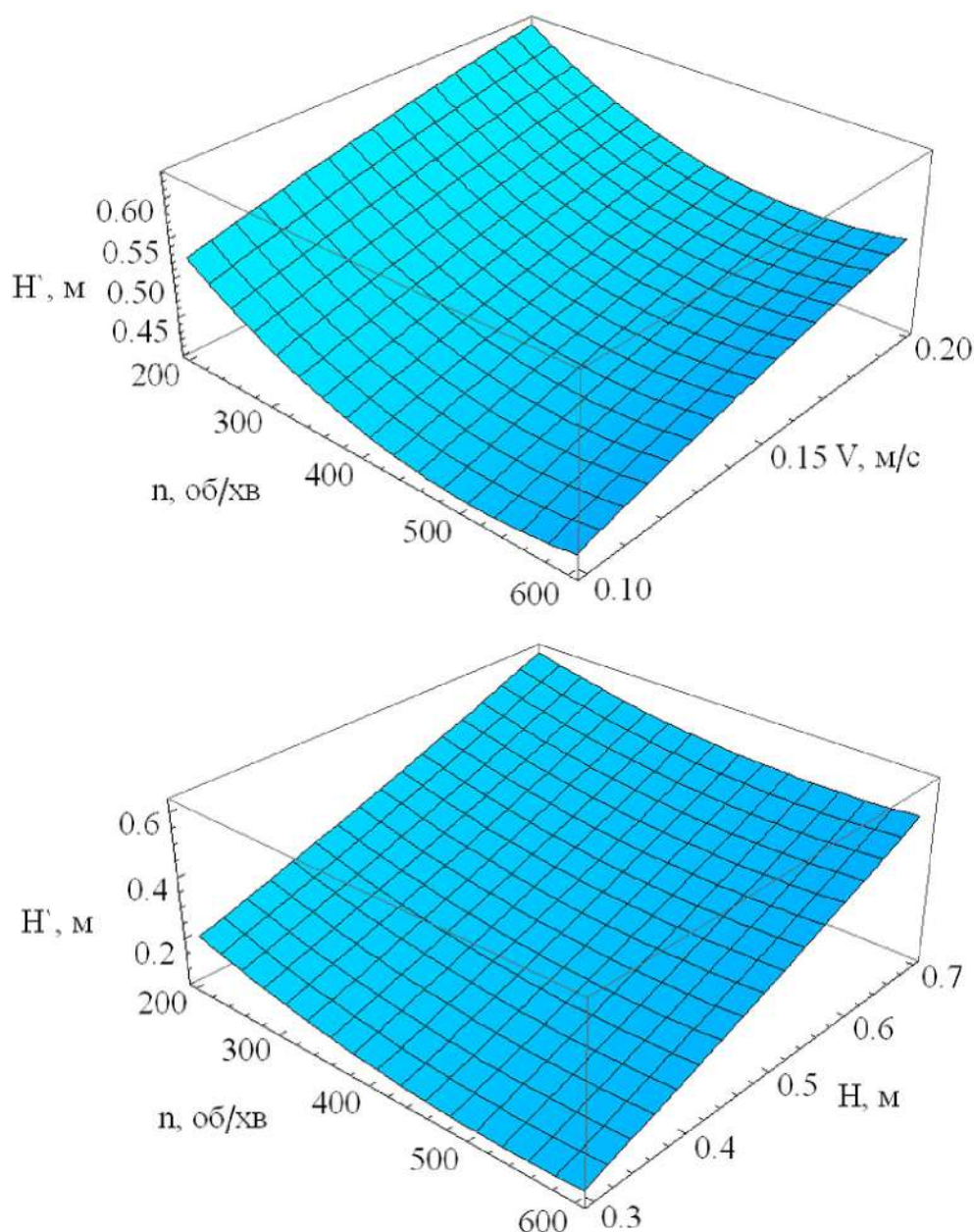


Рис. 7. Залежність висоти сформованого бурта від факторів досліджень
Fig. 7. The dependence of height formed clamp and research factors

Очевидно, що зі збільшенням лінійної швидкості переміщення робочого органу і висоти вихідного бурта збільшується і висота сформованого бурта. Однак для певної частоти обертання ($n = 537$ об/хв.) спостерігається мінімальне значення, висота сформованого бурта. Апроксимація отриманих даних в програмному пакеті Mathematica, дала змогу встановити рівняння залежності коефіцієнта варіації якості змішування від факторів досліджень:

$$\begin{aligned} \delta = & 1,0964 + 0,413927 H_0 - 0,569826 H_0^2 - 0,00161823 n - \\ & - 0,00023426 H_0 n + 1,44573 \cdot 10^{-6} n^2 - 1,94199 V + \\ & + 2,33282 H_0 V + 0,00149216 n V + 1,84121 V^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Графічна інтерпретація залежності (5) представлена на рис. 8.

$H_0 = 0,7$

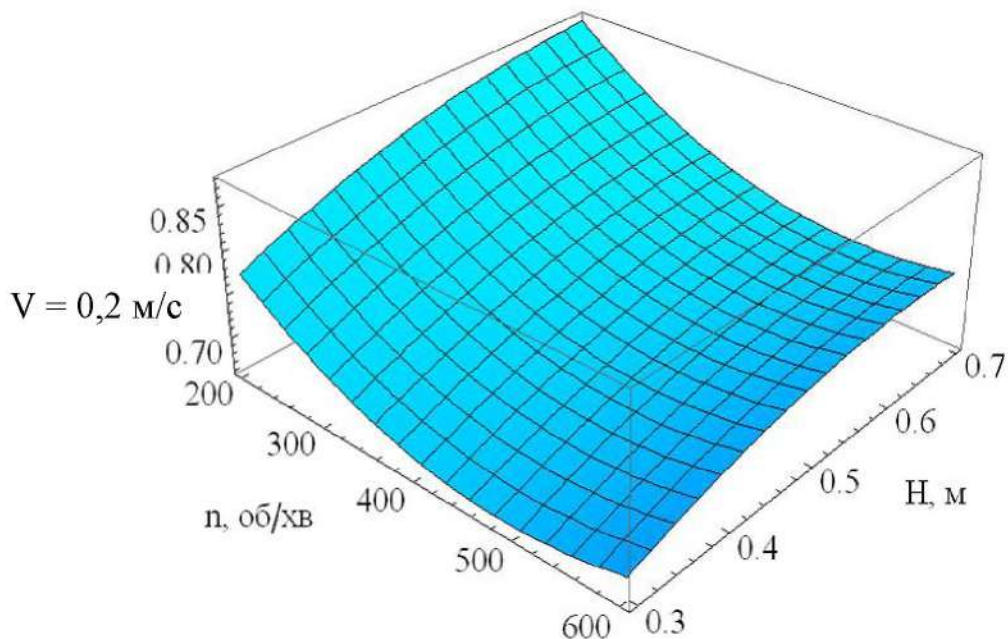
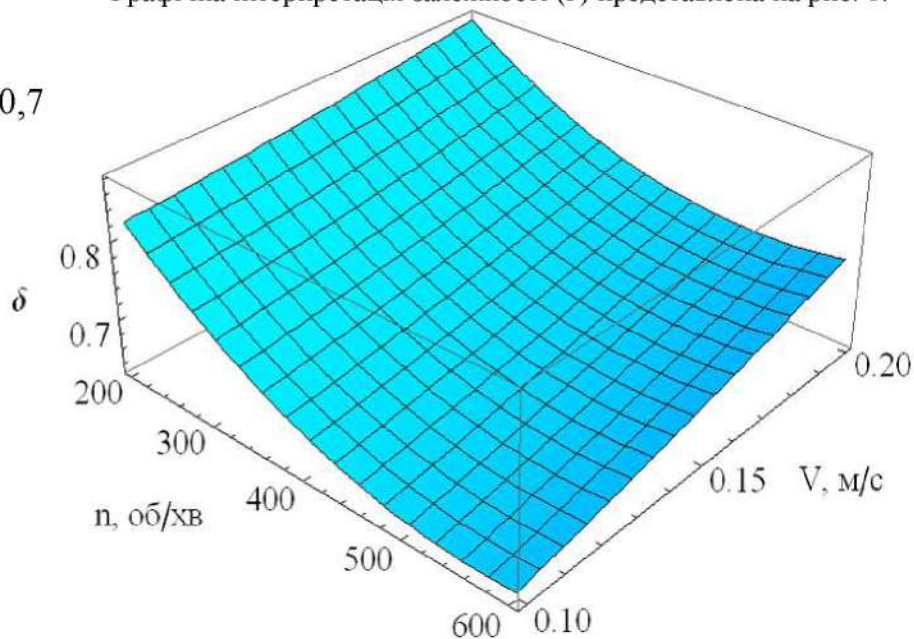


Рис. 8. Залежність коефіцієнта варіації якості змішування від факторів досліджень
Fig. 8. The dependence of quality mixing variation and research factors

Аналіз рис. 8 і рівняння (5) показує, що із поступовим збільшенням лінійної швидкості переміщення робочого органу і висоти вихідного бурта спостерігається збільшення коефіцієнта варіації якості змішування. Оптимальним є значення частоти обертання робочого органу ($n = 518$ об/хв.), при якому коефіцієнта варіації є мінімальним.

З використанням програмного пакету Mathematica складено математичний вираз, який зв'язав коефіцієнт варіації якості змішування δ із коефіцієнтом завантаження κ і кінематичним показником режиму роботи λ :

$$\delta = 0,667428 + 0,298578 \kappa - 0,0911722 \kappa^2 - 0,00112821 \lambda - 0,000888689 \kappa \lambda + 4,88711 \cdot 10^{-6} \lambda^2. \quad (6)$$

Графічна інтерпретація залежності (6) представлена на рис. 9.

Із рис. 9 видно, що при низькому значенні кінематичного показника режиму роботи ($\lambda = 16,8$) із збільшенням коефіцієнта завантаження збільшується і коефіцієнт варіації. На відміну від високого значення кінематичного показника режиму роботи ($\lambda = 251,3$), при якому зі збільшенням коефіцієнта завантаження, коефіцієнт варіації зменшується.

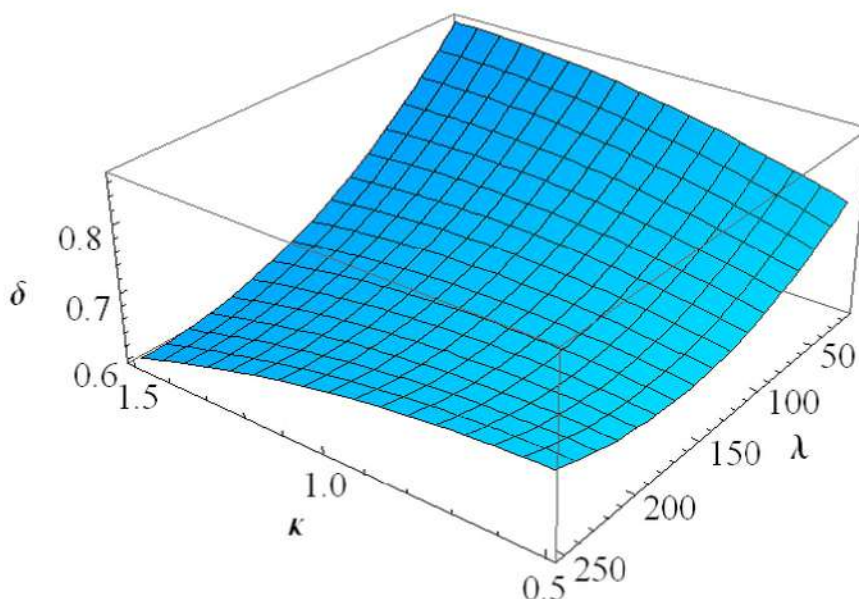


Рис. 9. Залежність коефіцієнта варіації якості змішування δ від коефіцієнта завантаження κ і кінематичного показника режиму роботи λ

Fig. 9. The dependence of quality mixing variation δ , mixing load factor κ and index of the kinematic mode λ

Висновки. В результаті теоретичних досліджень механічного змішування компонентів компостної суміші з використанням програмного забезпечення Star CCM+ розроблена математична модель, яка включає систему залежностей ступеня зменшення бурта та коефіцієнт варіації змішування від коефіцієнта завантаження і кінематичного показника режиму роботи. Встановлено, що при низькому значенні кінематичного показника режиму роботи ($\lambda = 16,8$) зі збільшенням коефіцієнта завантаження збільшується і коефіцієнт варіації. На відміну від високого значення кінематичного показника режиму роботи ($\lambda = 251,3$), при якому зі збільшенням коефіцієнта завантаження, коефіцієнт варіації зменшується.

Бібліографія

1. Ахмадиев Ф.Г. Моделирование и реализация способов приготовления смесей. – Журнал Всесоюзного хим. общества им. Д.И. Менделеева / Ф.Г. Ахмадиев, А.А. Александровский – Т. XXXIII, № 4. 1988.
2. Иванец В.Н. Энтропийный подход к оценке процесса смешивания сыпучих материалов / В.Н. Иванец, И.А. Бакин, Г.Н. Белоусов – Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. – №11. 2002.
3. Бакин И.А. Моделирование процесса смешивания энтропийно - информационным методом / И.А. Бакин, Г.Н. Белоусов, А.И. Саблинский – Новые технологии в научных исследованиях в образовании. Материалы Всероссийской научно - практической конференции. -Ч.1., г. Юрга. 2001.
4. Кафаров В.В. Математическая модель кинетики смешивания бинарных смесей, содержащих твердую фазу / В.В. Кафаров, И.И. Дорохов, А.А. Александровский // Докл. АН СССР. 1975. Т. 24. № 5. -С. 1134 – 1137.

5. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешивания сыпучих материалов / В.В. Кафаров, И.И. Дорохов, С.Ю. Арутюнов. М.: Наука, 1985. 440 с.
6. Конструирование и расчет машин химических производств: Учебник для вузов / Ю.И. Гусев, И.Н. Карасев, Э.Э. Кольман-Иванов, Ю.И. Макаров, М.П. Макевнин, Н.И. Рассказов. М.: Машиностроение, 1985. -406 с.
7. Кривцов А. М. Деформация и разрушение твердых тел с микроструктурой. – М.: Физматлит, 2007.- 304 с.
8. Pertti Broas. Advantages and problems of CAVE-visualisation for design purposes. – Trans. VTT Symposium “Virtual prototyping”. – Espoo,

Finland, February 1 st, 2001. – pp. 73–81. (<http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/2001/S210.pdf>).

9. Bai, C. 1996. "Modelling of spray impingement processes", Ph.D Thesis, University of London.

10. Johnson K.L. Contact Mechanics / K.L. Johnson // Cambridge University Press. – 1987. – 434 p.

11. Crowe, C.T., Sommerfeld, M., and Tsuji, Y. 1998. Multiphase Flows with Droplets and Particles. CRC Press, Boca Raton.

12. Komiwes V. Simulation of granular flow in a fluid applied to sedimentation / Komiwes V., Mege P., Meimon Y., Herrmann H. // Granular Matter. – 2006. – № 8 (1). – P. 41-54.

References

1. Ahmadyev F.G. Modelirovanie i realizatsiya sposobov prigotovleniya smesey. – Zhurnal Vsesoyuznogo him. obschestva im. D.I. Mendeleeva / F.G. Ahmadyev, A.A. Aleksandrovskiy – T. XXXIII. № 4. 1988.

2. Ivanets V.N. Entropiyniy podhod k otsenke protsessu smeshivaniya syipuchih materialov / V.N. Ivanets, I.A. Bakin, G.N. Belousov – Hranenie i perarabotka selskohozyaystvennogo syirya. – №11. 2002.

3. Bakin I.A. Modelirovanie protsessu smeshivaniya entropiyno - informatsionnyim metodom / I.A. Bakin, G.N. Belousov, A.I. Sablinskiy – Novyye tehnologii v nauchnyih issledovaniyah v obrazovanii. Materialy Vserossiyskoy nauchno - prakticheskoy konferentsii. Ch.1., g. Yurga. 2001.

4. Kafarov V.V. Matematicheskaya model kinetiki smeshivaniya binarnyih smesey, sodержashih tverduyu fazu / V.V. Kafarov, I.I. Dorokhov, A.A. Aleksandrovskiy // Dokl. AN SSSR. 1975. T. 24. -№ 5. S. 1134 – 1137.

5. Kafarov V.V. Sistemnyy analiz protsessov himicheskoy tehnologii. Protessyi izmelcheniya i smeshivaniya syipuchih materialov / V.V. Kafarov, I.I. Dorokhov, S.Yu. Arutyunov. M.: Nauka, 1985.- 440 s.

6. Konstruirovaniye i raschet mashin himicheskikh proizvodstv: Uchebnik dlya vuzov / Yu.I. Gusev, I.N. Karasev, E.E. Kolman-Ivanov, Yu.I. Makarov, M.P. Makevnyin, N.I. Rasskazov. M.: Mashinostroeniye, 1985. -406 s.

7. Krivtsov A. M. Deformatsiya i razrusheniye tverdyih tel s mikrostrukturoy. – M.: Fizmatlit, 2007. – 304 s.

8. Pertti Broas. Advantages and problems of CAVE-visualisation for design purposes. – Trans. VTT Symposium "Virtual prototyping". – Espoo, Finland, February 1 st, 2001. – pp. 73–81. (<http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/2001/S210.pdf>).

9. Bai, C. 1996. "Modelling of spray impingement processes", Ph.D Thesis, University of London.

10. Johnson K.L. Contact Mechanics / K.L. Johnson // Cambridge University Press. – 1987. – 434 p.

11. Crowe, C.T., Sommerfeld, M., and Tsuji, Y. 1998. Multiphase Flows with Droplets and Particles. CRC Press, Boca Raton.

12. Komiwes V. Simulation of granular flow in a fluid applied to sedimentation / Komiwes V., Mege P., Meimon Y., Herrmann H. // Granular Matter. – 2006. – № 8 (1). – P. 41-54.

References

1. Ahmadyev F.G. Modeling and implementation ways of cooking mixture. – Journal of Chemical Union. Society them D.I. Mendeleev / F.G. Ahmadyev, A.A. Aleksandrovskiy – T. XXXIII. № 4. 1988.

2. Yvanets V.N. Entropy approach for evaluation of process of mixing loose materials / V.N. Yvanets, I.A. Bakyn, G.N. Belousov – Storage and processing of agricultural raw materials. – №11. 2002.

3. Bakyn I.A. Simulation of the process of mixing entropy - information method / I.A. Bakyn, G.N. Belousov, A.I. Sablinskiy – New technologies for research in education. Proceedings of the scientific and practical conference. p.1., Yurga. 2001.

4. Kafarov V.V. Mathematical model of the kinetics of mixing of binary mixtures containing solids / V.V. Kafarov, I.I. Dorokhov, A.A. Aleksandrovskiy // Reports USSR Academy of Sciences. 1975. T. 24. № 5. -P. 1134 - 1137.

5. Kafarov V. Systems analysis processes chemical technology. Processes of grinding and mixing of bulk materials / V.V. Kafarov, I.I. Dorokhov, S.Y. Arutyunov. M.: Science, 1985.- 440 p.

6. Design and calculation of machines chemical industries: Textbook for Universities / Y.I. Gusev, I.N. Karasev, Э.Э. Colman-Ivanov, Y.I. Makarov, M.P. Makevnyin, N.I. Stories. M.: Engineering, 1985. -406 p.

7. Krivtsov A.M. Deformation and fracture of solids with microstructure. – M.: Fyzmatlyt, 2007. – 304 p.

8. Pertti Broas. Advantages and problems of CAVE-visualisation for design purposes. – Trans. VTT Symposium "Virtual prototyping". – Espoo, Finland, February 1 st, 2001. – pp. 73–81. ([Http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/2001/P-210.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/2001/P-210.pdf)).

9. Bai, C. 1996. "Modelling of spray impingement processes", Ph.D Thesis, University of London.

10. Johnson K.L. Contact Mechanics / K.L. Johnson // Cambridge University Press. – 1987. – 434 p.

11. Crowe, C.T., Sommerfeld, M., and Tsuji, Y. 1998. Multiphase Flows with Droplets and Particles. CRC Press, Boca Raton.

1. Komiwes V. Simulation of granular flow in a fluid applied to sedimentation / Komiwes V., Mege P., Meimon Y., Herrmann H. // Granular Matter. - 2006. – № 8 (1). – P. 41-54.