

УДК 636.084.76

**ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ РОБОТИ КОРМОРОЗДАВАЧА
ЗМІШУВАЧА-ПОДРІБНЮВАЧА МЕТОДОМ МОДЕЛЮВАННЯ****Г. П. Водяницький, І. П. Слюсаренко, В. В. Тимків***e-mail: grig40@gmail.com, inna.slusarenko13@gmail.com, vvtymkiv@gmail.com*

Житомирський національний агроекологічний університет

бульвар Старий, 7, м. Житомир, 10008, Україна

Моделювання технічної системи є одним з перших етапів пізнання її властивостей з метою подальшого удосконалення та грамотного використання. Змішування твердих компонентів з одночасним їх подрібненням вертикальним конічним шнековим робочим органом є складним робочим процесом, який автори аналітично описали через основні параметри робочого органу та режими протікання процесу. Отримані узагальнені фактори, завдяки чому кількість факторів з семи зменшилось до чотирьох. Це дає можливість скоротити обсяг експериментальної роботи у вісім разів та забезпечити ефективні результати, які оцінюють фактично дію факторів, що діють на вибраній критерій ефективності, коефіцієнт нерівномірності комплексно, а не нарізно. Модель дає можливість зробити якісну та кількісну оцінку процесу роботи кормороздавача-змішувача-подрібнювача, оптимізувати його параметри робочих органів та режими процесу роботи.

Встановлено, що коефіцієнт нерівномірності суміші залежить пропорційно (залежність б) від частоти обертання шнека (ω) помноженим на коефіцієнт (с), який залежить, у свою чергу, від об'єму бункера (V), фізико-механічних властивостей суміші, її об'ємної маси (ρ) та дотичного зусилля зсуву компонентів суміші (τ) та кроку шнека (e), зменшеного в значення коефіцієнта c_2 , який залежить від конструкції бункера змішувача. Крім того, на значення коефіцієнта нерівномірності суміші (v) також впливає швидкість циркуляції компонентів пропорційно зменшеному в C_3 разів, який залежить від конструктивних параметрів машини та фізико-механічних властивостей суміші, площі бокової поверхні шнека, зменшену у C_4 разів, що через залежність від конструктивних параметрів кормороздавача-змішувача-подрібнювача.

Результати дослідження використовуються на кафедрі при вивченні студентами курсів «Машини та обладнання для тваринництва», «Експлуатація технологічного обладнання для тваринництва», та «Обґрунтування рішень», а також можуть бути основою подальшого дослідження, та в проектно-конструкторській практиці.

Ключові слова: змішувач-подрібнювач, модель, безрозмірний комплекс, аналіз розмірностей, вертикальний шнек змінного діаметра, критерій подібності.

Постановка проблеми

Змішування – це процес рівномірного перерозподілення компонентів по всьому об'єму змішування матеріалів до стану рівномірної суміші. Однорідність суміші залежить від фізико-механічних властивостей компонентів; конструктивних рішень та режимів роботи змішувачів.

Недостатня вивченість та складність процесу і його широка розповсюдженість [1] вимагають додаткових досліджень і формалізації здобутих емпіричних знань про процес змішування, зокрема змішування сипких твердих компонентів кормових сумішей для тварин кормороздавачами-змішувачами з вертикальними шнековими робочими органами дообладнаними ножами.

Науковими дослідженнями та практикою доведено, що згодовування кормів у вигляді збалансованої, за всіма компонентами суміші, є на 15...30% ефективнішою за згодовування тих же компонентів роздільно[4,...12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Змішування супроводжує робочі процеси при задоволенні практично всіх потреб суспільства. Тому змішування досліджують як на емпіричному, так і теоретичному рівнях[1...4].

В основу досліджень покладено фізичне та математичне моделювання [1...12]. При моделюванні змішування сипких матеріалів використовують закони Фіката, математичну модель Нав'є-Стокса [1...12]. Для кожного окремого випадку потоку сипких матеріалів, на підставі положень [21], дослідники обирають типові математичні моделі[1]: ідеального

витіснення, ідеального змішування, дифузійну, коміркову чи комбіновану моделі. Кожна із цих моделей має певні позитивні властивості і достатньо забезпечує її адекватність процесу змішування сипких матеріалів. В загальному, використання моделей дає можливість описати явища змішування як трьохетапної системи типу “процес”. На першому етапі здійснюється, макропереміщення компонентів, так зване конвективне рознесення їх у внутрішньому об’ємі змішувача. При цьому, має місце висока швидкість зниження коефіцієнта неоднорідності суміші. Наприкінці етапу в робочому об’ємі змішувача немає макрооб’ємів, що складаються з частинок одного компонента. Конвективне змішування залежить від конструкції змішувача та режимів його роботи, які визначають характер руху потоку компонентів у змішувачі. Етап “макропереміщення” відбувається сумісно з етапом “мікропереміщення”, або дифузії, коли компоненти проникають через межі макрооб’ємів, подальше зменшуючи коефіцієнт неоднорідності суміші. Наростання дифузії визначається фізико-механічними властивостями компонентів суміші. Паралельно з конвекцією та дифузиею з наростаючим темпом відбувається третій етап змішування, сегрегації [9, 10], який погіршує коефіцієнт нерівномірності розподілу компонентів суміші, тобто впливає на процес змішування. Як і дифузія, сегрегація залежить від фізико-механічних властивостей компонентів, а також, крім того, вона залежить від конструкції та режимів роботи змішувача.

Слід зазначити, що результати досліджень [1...12] процесу змішування сипких неоднорідних матеріалів, сумісно з подрібненням вертикальними шнековими кінчними робочими органами, є досить обмеженими. Особливістю конструкції робочого органу є те, що шнек обертається в обмеженому стінками сипкої маси просторі [11]. Таким чином, робочий орган забезпечує осьове переміщення вгору компонентів за рахунок взаємодії компонентів з безперервно утворюючою обмежувальною стінкою з сипкої маси. Сучасний кормороздавач-змішувач забезпечений досконаліми робочими органами з високою стійкістю різальних органів та їх мінімальною енергомісткістю [17, 18].

Мета, завдання та методика досліджень

Метою цієї роботи є дослідження силової та кінематичної дії частинок потоку компонентів у

процесі змішування, з використанням математичного та фізичного моделювання.

Об’єктом нашого дослідження є технологічна система змішування кормів, в якій засобом виробництва є вертикальний змішувач-подрібнювач зі змінним діаметром шнека, а предметом дослідження є компоненти збалансованої суміші з різними фізико-механічними властивостями.

Для досягнення мети дослідження використовуємо метод моделювання, який дасть можливість встановити закономірність процесу між визначальними та визначаючими критеріями. Дане завдання відноситься до фізичних, в яких відсутній фундаментальний фізичний закон, що регулює процес, в даному випадку змішування з подрібненням твердих матеріалів з різними фізико-механічними властивостями (завдання другого виду) [14]. Обираємо незалежні фактори та функцію – коефіцієнт нерівномірності розподілення компонентів. Визначаємо початкові умови та виражаємо всі фактори через час змішування, функцію та її похідну [13]. Складаємо диференціальне рівняння за процесом роботи системи. Знаходимо розв’язок загальних і окремих частин та аналізуємо отриманий результат. Таким чином, досліджуємо процес змішування і необхідні кінематичні показники змішувача-подрібнювача.

Для спрощення та розв’язування отриманих залежностей приводимо диференціальні рівняння до критеріального вигляду за правилом інтегральних аналогів [6, 15].

При цьому, зменшується кількість змінних, знижується складність та підвищується рівень загального опису фізичного процесу змішування.

Методика правила інтегральних аналогів полягає в наступному: вилучаємо символи зв’язку між членами рівняння (символи диференціювання, інтегрування та неоднорідні функції); замінюємо всі члени рівняння на їх інтегральні аналоги; розділяємо всі члени рівняння (за винятком вилучених неоднорідних функцій) на один із них та отримуємо $n-1$ критеріїв подібності; доповнюємо отриману систему критеріїв подібності додатковими критеріями, у вигляді аргументів неоднорідних функцій, що входять у рівняння, та перетворюємо отримані критерії подібності в іншу, більш зручну форму запису їх перемноженням, діленням, піднесенням до ступеня чи множенням на постійний коефіцієнт тощо [6, 15, 16].

Для оцінки впливу на процес змішування параметрів змішувача (геометричні і кінематичні) та фізико-механічних властивостей компонентів корму складаємо моделі методом аналізу розмірностей [6, 16, 19]. Така модель описує детально внутрішній механізм процесу змішування [6, 15, 16] та дозволяє оптимізувати параметри і режими процесу змішування кормороздавачем-подрібнювачем змішувачем.

Таким чином, правило інтегральних аналогів використовуємо при відомому формалізовано описуваному фізичному процесі. В разі відсутності опису процесу доцільно використовувати метод аналізу розмірностей [6, 15, 16, 19].

Методика використання методу аналізу розмірностей [6, 21] передбачає вибір незалежних змінних, які впливають на досліджуваний об'єкт. Для нашого об'єкту дослідження, це:

$$\frac{dv}{dt} = f(V, \rho, \omega, l, \tau, \vartheta, S), \quad (1);$$

де $\frac{dv}{dt}$ – швидкість вирівнювання

контрольного компонента в суміші, $\frac{кг}{м^3}$;

v – середнє квадратичне відхилення кількості контрольного компонента в суміші, кг;

t – час змішування, с;

V – об'єм бункера, $м^3$;

ρ – об'ємна маса компонентів суміші, $\frac{кг}{м^3}$;

ω – частота обертання шнека, $с^{-1}$;

l – крок шнека, м;

τ – дотичне зусилля здвигу частинок корму,

Па;

ϑ – швидкість переміщення компонентів, суміші, $\frac{м}{с}$;

S – площа бокової поверхні витка шнека, $м^2$.

При оцінці незалежних змінних враховуємо розмірні коефіцієнти та фізичні константи.

Обираємо систему основних розмірностей, через які можна виразити всі вибрані змінні, використовуючи систему основних розмірностей MLT.

Після цього записуємо розмірності незалежних найбільш суттєвих (вагомих) некорельованих змінних: $V, \rho, \omega, l, \tau, \vartheta, S$ та складаємо безрозмірні комбінації. За основні обираємо величини V, ρ, τ .

Перевіряємо правильність складених комбінацій, або ще їх називають [6] – узагальненими параметрами. Пам'ятаючи, що кожна комбінація є безрозмірною, кількість комбінацій має бути рівною $n-k$, тобто рівною різниці незалежних змінних (n) і обраної кількості основних величин (k). Кожна змінна має зустрічатися в комбінаціях хоча би один раз.

Результати досліджень

Процес змішування сипких компонентів відбувається паралельно з подрібненням вертикальним шнеком змінного діаметра, з розставленими дотично до його зовнішніх країв ножами, за рахунок дії гравітаційної ($G=mg$) та відцентрової ($F = \frac{mv^2}{R}$) сил і переміщенням компонентів суміші вздовж осі ($S = vt$) вверх та циркуляції їх в горизонтальній площині бункера-змішувача.

Фізична природа процесу змішування сипких матеріалів на підставі виконаних досліджень [1...12] та сучасної методики математичного моделювання [13,14] дають можливість описати даний процес диференціальним рівнянням першого порядку з відокремлюваними змінними:

$$\frac{dv}{dt} = -kv(t), \quad (2)$$

яке описує цілий клас подібних природних процесів. Розв'язок рівняння (2) виражає функція:

$$v = Ce^{-kt}, \quad (3)$$

а з врахуванням початкових і граничних умов, функція процесу даної технологічної системи матиме вигляд:

$$v = 0.998e^{-0.5t}, \quad (4)$$

При вірогідності $R^2 = 1.00$.

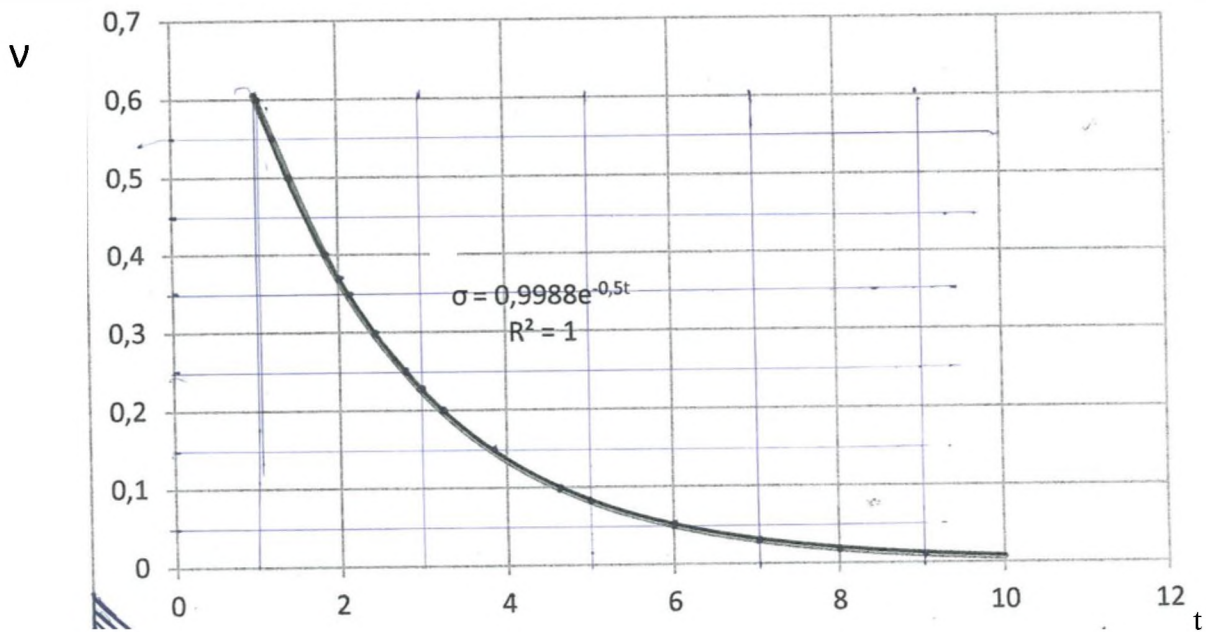


Рис. 1. Залежність коефіцієнта неоднорідності суміші в часі

Рівняння (2) адекватно описує процес роботи досліджуваної в даному випадку моделі ідеального змішування, оцінюючи якість перемішування коефіцієнтом нерівномірності на етапах конвективного диференційного змішування та на початку етапу сегрегації. Коефіцієнт поступово та плавно знижується і на $t=10$ хв складає $V = 0.07$.

Не всі відомі математичні моделі мають аналітичний розв'язок, а отже є можливість дослідити процес та оптимізувати його режими оптимального протікання та визначити параметри технічної системи, яка реалізує даний процес. Так, зокрема має місце з моделями [1 5, 7], які описують складний процес. Тому для даного випадку доцільним буде перетворення диференціального рівняння у критеріальне. Для цього використовуємо правило інтегральних аналогів [15]. Дане правило дозволяє наблизити похибку рівняння до похибки вихідних даних, а за складності чи неможливості визначити фізичну величину, яка входить у критеріальне рівняння, виконати її шляхом перемноження, ділення, піднесення у ступінь тощо. Отримаємо рівняння похідне від першого.

Так, математична модель ідеального витіснення [1, 5], близька до конвективного змішування:

$$\frac{dc}{dt} = -v \frac{dc}{dx}, \quad (5)$$

де c – концентрація ключового компонента, %;

t – час, с;

v – лінійна швидкість суміші, м/с;

x – координата, м;

Записавши $\frac{dc}{dt} + v \frac{dc}{dx} = 0$ та прийнявши

$$[15] \quad \varphi_1 = \frac{dc}{dt}, \quad \text{а} \quad \varphi_2 = \frac{dc}{dx} \quad \text{і} \quad \varphi_1' = \frac{c}{t}, \quad \text{а} \quad \varphi_2' = \frac{c}{l}$$

та розділивши перший член на другий, отримаємо $\pi = \frac{vt}{l}$. Після піднесення до ступеня

$a = -1$, отримаємо $\pi' = \frac{l}{vt}$ – критерій, який

характеризує швидкість зміни концентрації контрольного компонента суміші. Дифузійна модель відповідає потоку суміші з поршневым рухом

$$\frac{dc}{dt} = -v \frac{dc}{dx} + D_L \frac{d^2c}{dx^2}, \quad (6)$$

де D_L – коефіцієнт повздовжнього перемішування.

Запишемо рівняння (6) у вигляді:

$$\frac{dc}{dt} + v \frac{dc}{dx} - D_L \frac{d^2c}{dx^2} = 0.$$

Приймаємо $\varphi_1 = \frac{dc}{dt}$; $\varphi_2 = v \frac{dc}{dx}$; [15] $\varphi'_1 = \frac{c}{t}$; $\varphi'_2 = v \frac{l}{t}$; $\varphi'_3 = D_L \frac{t}{l}$
 $\varphi_3 = D_L \frac{d^2c}{dt^2}$ та відповідно до методики отримаємо $\pi_1 = \frac{vt}{l}$ і $\pi_2 = \frac{D_L t}{l^2}$.

Аналогічно за двопараметричної дифузійної моделі:

$$\frac{dc}{dt} = -v \frac{dc}{dx} + D_2 \frac{d^2c}{dt^2} + \frac{D_K}{R} \cdot \frac{d}{dR} \left(R \frac{dc}{dR} \right), \quad (7)$$

де D_K – коефіцієнт поперечного переміщення;

R і X – радіальна і осьова координати змішування подрібнювача, м.

Після аналітичних перетворень отримаємо $\pi_1 = \frac{vt}{l}$; $\pi_2 = \frac{D_L t}{l^2}$; $\pi_3 = \frac{D_K t}{l^2}$.

На підставі цілей дослідження та властивостей критеріїв подібності [6, 16, 21] оцінюємо визначальний (поле швидкостей потоку суміші) та визначаючі критерії і записуємо рівняння у вигляді степінного одночлена.

$$\pi_1 = A \cdot \pi \cdot \frac{a}{2} \cdot \pi_3^b,$$

де A – коефіцієнт пропорційності ступенів; a і b – показники ступенів. A , a і b оцінюємо за результатами реалізації плану повного факторного експерименту типу 2^2 [19].

Механізм дії, який забезпечує процес роботи змішувача, залежить від його конструкції [1]. Більшість залежностей, які наразі відомі [1, 5], не враховують конструктивні параметри і режими роботи змішувачів і, зокрема з вертикальним конічним шнеком, обладнаного ножами, який працює в обмеженому стінками сипкої маси просторі. Для складання співвідношень між параметрами і режимами роботи даної технологічної системи використовуємо метод аналізу розмірностей.

На підставі другої теореми подібності [6, 16, 19] визначаємо критерії подібності для критеріального рівняння на підставі рівняння (1).

Розрахунок матриці розмірностей, при $k=3$ обраних основних величин V, ρ, τ показує, що її визначник не рівний нулеві, $\Delta = -6$.

Кількість узагальнених параметрів, при $m = 7$ суттєвих незалежних факторів, які

вагомо визначають напрямок процесу, $k_{\pi} = m - k = 7 - 3 = 4$.

Запишемо коефіцієнт нерівномірності суміші через суттєві фактори:

$$\frac{dv}{dt} = f(V, \rho, w, \ell, \tau, v, S) \quad (9)$$

Визначимо всі фактори залежності (9) через основні величини V, ρ, τ :

$$\frac{dv}{dt} \cdot (v^{-a} \cdot \rho^{-b} \tau^{-c}) = \frac{f(w, \ell, v, S)}{v^a \cdot \rho^b \tau^c}, \quad (10)$$

За певних значень показників a, b, c , залежність (10) запишеться у вигляді безрозмірних комплексів. Для цього використовуємо метод нульових розмірностей і визначаємо значення a, b, c , спочатку для лівої частини залежності (10), за умови вираження її безрозмірним комплексом величин.

Для цього позначимо $\frac{dv}{dt} = U'$. Тоді

$$\frac{v'}{v^a \cdot \rho^b \cdot \tau^c} = \frac{U'}{L^{2a} \cdot (M \cdot L^{-2})^b \cdot (M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2})^c}. \quad (11)$$

Записуємо показники за однакових розмірностей, дотримуючись умови їх однорідності [6]:

$$(M)^{-b-c} \cdot (L)^{-3a+3b+c} \cdot (T)^{-1+2c} = 1.$$

Дана рівність буде справедливою, наприклад, коли:

$$\begin{cases} -b - c = 0, \\ -3a + 3b + c = 0, \\ -1 + 2c = 0. \end{cases}$$

Розв'язавши систему трьох рівнянь з трьома невідомими a, b, c , знаходимо $a = -\frac{1}{3}$; $b = -\frac{1}{2}$; $c =$

$$\frac{1}{2}.$$

Тоді ліва частина залежності (10) запишеться:

$$\frac{v'}{v^{-\frac{1}{3}} \cdot \rho^{-\frac{1}{2}} \cdot \tau^{\frac{1}{2}}} = 1, \text{ або після перетворення}$$

$$\frac{v \cdot \sqrt[3]{V}}{\sqrt{\rho}} = 1. \quad (12)$$

Аналогічно перетворюємо складові правої частини залежності (10):

$$\frac{w}{V^{a_1} \cdot \rho^{b_1} \cdot \tau^{c_1}} = \frac{T^{-1}}{L^{3a_1} \cdot (M \cdot L^{-3})^{b_1} \cdot (M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2})^{c_1}} \quad (13)$$

Записуємо показники за однакових розмірностей:

$$M^{-b_1 - c_1} L^{-3a_1 + 3b_1 + c_1} T^{2c_1 - 1} = 1.$$

Дана рівність буде справедлива, коли, наприклад:

$$\frac{\omega}{V^{a_1} \rho^{b_1} \tau^{c_1}} = \frac{\omega}{V^{-\frac{1}{3}} \rho^{-\frac{1}{2}} \tau^{\frac{1}{2}}} = \frac{\omega \sqrt[3]{V}}{\sqrt{\tau}} = \omega \sqrt{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}}.$$

Перетворюємо складову l правої частини залежності (10):

$$\frac{l}{V^{a_2} \rho^{b_2} \tau^{c_2}} = \frac{L}{L^{3a_2} (ML^{-3})^{b_2} (ML^{-1} T^{-2})^{c_2}}.$$

Записуємо показники за однакових розмірностей

$$M^{-b_2 - c_2} L^{1 - 3a_2 + 3b_2 + c_2} T^{2c_2} = 1,$$

При умові, що

$$\begin{cases} -b_2 - c_2 = 0 \\ 1 - 3a_2 + 3b_2 + c_2 = 0 \\ 2c_2 = 0 \end{cases}$$

$$c_2 = 0; -b_2 = c_2 = 0;$$

$$1 - 3a_2 + 0 + 0 = 0; a_2 = \frac{1}{3}.$$

Тоді маємо:

$$\frac{l}{V^{a_2} \rho^{b_2} \tau^{c_2}} = \frac{l}{V^{\frac{1}{3}}} = \frac{l}{\sqrt[3]{V}},$$

Перетворюємо складову ϑ правої частини залежності(10):

$$\frac{\vartheta}{V^{a_3} \rho^{b_3} \tau^{c_3}} = \frac{L T^{-1}}{L^{3a_3} (M L^{-3})^{b_3} (M L^{-1} T^{-2})^{c_3}}.$$

Записуємо показники за однакових розмірностей

$$M^{-b_3 - c_3} M^{-b_3 - c_3} L^{1 - 3a_3 + 3b_3 + c_3} T^{-1 + 2c_3} = 1$$

умовою, що

$$\begin{cases} -b_1 - c_1 = 0, \\ -3a_1 + 3b_1 + c_1 = 0, \\ 2c_1 - 1 = 0 \end{cases}.$$

Розв'язуємо систему трьох рівнянь з трьома невідомими:

$$c_1 = \frac{1}{2}; -b_1 = c_1 = \frac{1}{2}; b_1 = -\frac{1}{2};$$

$$a_1 = \frac{3 \cdot (-\frac{1}{2}) + \frac{1}{2}}{3} = -\frac{1}{3};$$

$$c_1 = \frac{1}{2}; b_1 = -\frac{1}{2}; a_1 = -\frac{1}{3}.$$

Тоді

$$\begin{cases} -b_3 - c_3 = 0, \\ 1 - 3a_3 + 3b_3 + c_3 = 0, \\ -1 + 2c_3 = 0, \end{cases} \quad (14)$$

$$-b_3 = c_3, b_3 = -\frac{1}{2}; 2c_3 = 1, c_3 = \frac{1}{2};$$

$$1 - 3a_3 + \frac{3}{2} - \frac{1}{2} = 0, a_3 = \frac{2}{3}.$$

Тоді

$$\frac{\vartheta}{V^{a_3} \rho^{b_3} \tau^{c_3}} = \frac{\vartheta}{V^{\frac{2}{3}} \rho^{-\frac{1}{2}} \tau^{\frac{1}{2}}} = \frac{\vartheta}{\sqrt[3]{V^2} \sqrt{\tau}} = \frac{\vartheta}{\sqrt[6]{V^4 \tau^3}}, \quad (16)$$

Нарешті запишемо вираз:

$$\frac{s}{V^{a_4} \rho^{b_4} \tau^{c_4}} = \frac{L^2}{L^{3a_4} (M L^{-3})^{b_4} (M L^{-1} T^{-2})^{c_4}}.$$

Представимо показники при однакових розмірностях

$$M^{-b_4 - c_4} L^{2 - 3a_4 + 3b_4 + c_4} T^{2c_4} = 1$$

за умови, що

$$\begin{cases} -b_4 - c_4 (\neq 0), \\ 2 - 3a_4 + 3b_4 + c_4 = 0, \\ 2c_4 = 0, \end{cases}$$

$$-b_4 = c_4, b_4 = 0; 2c_4 = 0, c_4 = 0;$$

$$2 - 3a_4 + 0 + 0 = 0, a_4 = \frac{2}{3}.$$

Тоді

$$\frac{s}{V^{a_4} \rho^{b_4} \tau^{c_4}} = \frac{s}{V^{\frac{2}{3}} \rho^0 \tau^0} = \frac{s}{\sqrt[3]{V^2}}, \quad (17)$$

В загальному вигляді вираз (9) запишеться через критерії подібності (узагальнені фактори):

$$v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} = f \left(\omega \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}}; \frac{l}{\sqrt[3]{V}}; \frac{v}{\sqrt[6]{\frac{V^4 \tau^3}{\rho^3}}}; \frac{S}{\sqrt[3]{V^2}} \right), \quad (18)$$

Таким чином, коефіцієнт нерівномірності суміші залежить пропорційно від частоти обертання шнека (ω) помноженим на коефіцієнт $C_1 = \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}}$ та кроку шнека (l), зменшеному в $C_2 = \frac{1}{\sqrt[3]{V}}$; швидкості циркуляції частинок компонентів суміші (v), зменшеному в $C_3 = \frac{1}{\sqrt[6]{\frac{V^4 \tau^3}{\rho^3}}}$ та площі бокової поверхні шнека (S) зменшеній в $C_4 = \frac{1}{\sqrt[3]{V^2}}$ разів.

При цьому, коефіцієнт залежить від чотирьох визначаючих факторів, які комплексно діють на функцію, а не окремо, залежність (9). Такий підхід скорочує обсяг експериментальної роботи, для меншого числа узагальнених факторів на функцію, відображає системний реальний процес.

$$4 \lg(v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}}) = \lg \cdot k_1 + \lg \cdot k_2 + \lg \cdot k_3 + \lg \cdot k_4 + x_1 \lg(\omega \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}}) + x_2 \lg\left(\frac{l}{\sqrt[3]{V}}\right) + x_3 \lg\left(\frac{v}{\sqrt[6]{\frac{V^4 \tau^3}{\rho^3}}}\right) + \lg\left(\frac{S}{\sqrt[3]{V^2}}\right), \quad (20)$$

Виконаємо потенціювання та отримаємо:

$$v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} = A \cdot \left(\omega \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}}\right)^a \cdot \left(\frac{l}{\sqrt[3]{V}}\right)^b \cdot \left(\frac{v}{\sqrt[6]{\frac{V^4 \tau^3}{\rho^3}}}\right)^c \quad (21)$$

де A – коефіцієнт, $A = \sqrt[4]{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}$

$$a = \frac{x_1}{6}, b = \frac{x_2}{6}, c = \frac{x_3}{6}, d = \frac{x_4}{6}.$$

Таким чином, ми маємо критеріальне рівняння (21), в якого невідомими є

Отримана модель є простою і доступною для подальшого аналізу та синтезу процесу змішування. Зв'язок між визначальними і визначаючими критеріями мають такий вигляд, коли можна оцінити вплив окремих узагальнених факторів на визначальний критерій:

$$\begin{aligned} v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} &= k_1 (\omega \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}})^{x_1}, \\ v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} &= k_2 \left(\frac{l}{\sqrt[3]{V}}\right)^{x_2}, \\ v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} &= k_3 \left(\frac{v}{\sqrt[6]{\frac{V^4 \tau^3}{\rho^3}}}\right)^{x_3}, \\ v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} &= k_4 \left(\frac{S}{\sqrt[3]{V^2}}\right)^{x_4}. \end{aligned} \quad (19)$$

Прологарифмуємо залежності (19):

показниками ступенів: a, b, c, d . Коефіцієнти визначаємо експериментальним способом [18], використавши залежність (18). Коефіцієнти k_1, k_2, k_3, k_4 і показники ступенів оцінюють вплив відповідних узагальнених факторів на коефіцієнт нерівномірності суміші.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Вперше виконано моделювання процесу змішування-подрібнення з різними фізико-механічними властивостями твердих кормових компонентів, вертикальним конічним шнеком із закріпленими дотично до його зовнішніх країв ножами. Використано метод аналізу розмірностей [6, 10] з отриманням моделі, яка описує внутрішній механізм процесу подрібнення та змішування, що дозволяє оптимізувати параметри і режими робочого процесу кормороздавача змішувача-подрібнювача. Доцільно для отримання моделі загального описування процесу змішувачами компонентів описати процес диференціальними рівняннями, що дасть можливість оцінити адекватність отриманої моделі, порівнюючи її з існуючими моделями [1, 2, 3, 5, 7]. Окрім того, бажано оцінити техніко-економічний рівень кормороздавачів-змішувачів-подрібнювачів фірм світу, для визначення перспективного технічного рішення.

References

1. Makarov, Y. I. (1973). Apparaty dlya smesheniya syipuchih materialov [Apparatus for mixing bulk materials]. Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
2. Strenk, F. (1985). Peremeshivanie i apparaty s meshalkami [Stirring and agitating machines]. Leningrad: Himiya [in Russian].
3. Kukta, G. M. (1971). Optimalnaya prodolzhitel'nost smeshivaniya komponentov kombikormov [The optimal duration of mixing the components of feed]. *Mehanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo hazayaystva*, 11, 74–79 [in Russian].
4. Melnikov, S. V. (1978). Mehanizatsiya i avtomatizatsiya zhivotnovodcheskih ferm [Mechanization and automation of livestock farms]. Leningrad: Kolos [in Russian].
5. Dereza, O. O. & Dereza, S. V. (2014). Analiz metodiv modeliuвання protsesu zmishuvannya kormiv [Analysis of methods for modeling the process of mixing feed]. *Naukovyi visnyk*

Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnologichnoho universytetu, 4 (1), 95–101 [in Ukrainian].

6. Guhman, A. A. (1973). Vvedenie v teoriyu podobiya [Introduction to the theory of similarity]. Moskva: Vysshaya shkola [in Russian].

7. Briukhovetskyi, A. M. & Boiarskyi, O. V. (1994). Modeliuвання protsesu zmishuvannya syipkykh komponentiv u lopatevomu zmichuvachi periodychnoi dii [Simulation of the process of mixing friable components in a blade of periodic action]. Kyiv: Urozhai [in Ukrainian].

8. Rud, A. V., Evstratova, N. N. & Belousov, K. Yu. (2013). Razlichnyie podhody k modelirovaniyu protsesa dvizheniya materiala v vertikalnom vintovom konveyere [Different approaches to modeling the process of movement of material in a vertical screw conveyor]. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld*, 4, 68–74 [in Russian].

9. Isaienko, A. M., Kachan, Yu. H. & Ivanov, V. I. (2007). Pro modeliuвання sehrehaty rudy pid chas rukhu pokhyloi poverkhneiu [On modeling of ore segregation during sloping motion]. *Matematychni modeliuвання*, 1, 33–39 [in Ukrainian].

10. Nepochatov, D. M., Rusalev, A. M. & Boyko, I. G. (2011). Svodoobrazovanie syipuchih kormov i metodika ego opredeleniya [The formation of bulk feed and the method of its determination]. *Visnyk Harkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 108, 223–230 [in Russian].

11. Hevko, I. B., Kalatsina, Yu. B. & Levenets, V. D. (2002). Zmishuvannya syipkykh materialiv hvyntovymy robochymy orhanamy [Mixing of bulk materials with screw working organs]. *Mizhvuzivskiy zbirnyk Luganskoho dergavnogo tekhnichnoho universytetu*, 11, 75–83 [in Ukrainian].

12. Chvartatskyi, R. I. (2017). Obhruntuvannya parametriv mashyn dlia podribnennia i zmishuvannya kormiv [Justification of parameters of machines for grinding and mixing of forages]. Ternopil [in Ukrainian].

13. Ponomarev, K. K. (1973). Sostavlenie differentsialnykh uravneniy [Compilation of differential equations]. Moskva: Vysshaya shkola [in Russian].

14. Polyuhovich, N. V. (2010). Metodicheskie osnovy obucheniya studentov resheniyu prikladnykh zadach po teme: Differentsialnye uravneniya [Methodical foundations of teaching students to solve applied problems on the topic: "Differential Equations"]. *Yaroslavskiy pedagogicheskii vestnik*, 2, 131–139 [in Russian].

15. Hlinenko, L. K. & Sukhonosov, O. H. (2003). Osnovy modeliuвання tekhnichnykh system

[Fundamentals of technical systems modeling]. Lviv: Besket Bit [in Ukrainian].

16. Shenk, H. (1972). Teoriya inženernogo eksperimenta [Theory of Engineering Experiment]. Moskva: Mir [in Russian].

17. Khmelovskiy, V. (2013). Obhruntuvannia parametriv bunkera kormopryhotuvalnoho ahrehatu [Justification of the parameters of the hopper of the feed preparation unit]. *Tekhnika i tekhnolohii APK*, 6, 13–15 [in Ukrainian].

18. Basarhin, V. A., Vodianytskyi, H. P. & Tymkiv, V. V. (2017). Vyznachennia tekhnichnoho ravnivnia kormorozdavachiv-zmishuvachiv firmy svitu [Determination of the technical level of fodder mixers of the firm of the world]. *Tvarynnystvo Ukrainy*, 3/4, 10–13 [in Ukrainian].

19. Hrabar, I. H. & Vodianytskyi, H. P. (2013). Teoriia ta tekhnolohiia naukovykh doslidzhen [Theory and technology of scientific research]. Zhytomyr: ZhNAEU [in Ukrainian].

20. Shterbachek, Z. & Tausk, P. (1963). Peremeshivanie v himicheskoy promyshlennosti [Mixing in the chemical industry]. Leningrad: GSHCh [in Russian].

21. Venikov, V. A. & Venikov, G. V. (1984). Teoriya podobiya i modelirovanie [Similarity Theory and Modeling]. Moskva: Vysshaya shkola [in Russian].

22. Grigorev, A. M. (1972). Vintovyye konveyery [Screw conveyors]. Moskva: Mashinostroenie [in Russian].

JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS AND MODES OF OPERATION OF THE FEEDER MIXER SHREDDER METHOD OF MODELING

G. Vodyanitsky, I. Slyusarenko, V. Tymkiv
e-mail: grig40@gmail.com,
inna.slusarenko13@gmail.com,
vvtymkiv@gmail.com

Zhytomyr National Agroecological University
Sary Boulevard, 7, Zhytomyr, 10002, Ukraine

The modeling of a technical system is one of the first stages of cognition of its properties with the aim of further improvement and proper use. Mixing of solid components with their simultaneous grinding by a vertical conical screw working body is a complex workflow, which the authors analytically described through the main parameters of the working body and the modes of the process. The obtained generalized factors, due to which the number of factors from seven decreased to four. This makes it possible to reduce the amount of experimental work by eight times and provide effective results that evaluate the actual action of the

factors acting on the selected performance criterion, the coefficient of unevenness in a complex, rather than separately. The resulting model allows you to make a qualitative and quantitative assessment of the process of operation of the feeder-mixer-grinder, to optimize its parameters of the working bodies and modes of operation.

It has been established that the coefficient of unevenness of the mixture depends proportionally (dependence 6) on the speed of the screw (ω) multiplied by the coefficient (c), which depends in turn on the volume of the bunker (V), the physicomechanical properties of the mixture, its bulk mass (ρ), and the tangential shear force of the components of the mixture (τ) and the step of the screw (e), reduced to the value of the coefficient c_2 , which depends on the design of the mixer hopper. In addition, the ratio of the coefficient of unevenness of the mixture (v') is also proportional to the speed of circulation of components reduced in c_3 times, which depends on the design parameters of the machine, and the physical and mechanical properties of the mixture, the area of the side surface of the screw is reduced to c_4 times, which is alternating from the design parameters of the feeder-mixer-shredder.

The results of the study are used when students study the courses "Machines and Equipment for Livestock", "Operation of Technological Equipment for Livestock" and "Justification of Solutions", and can also be the basis for further research, as well as in design practice.

Keywords: mixer grinder, model, dimensionless complex, dimension analysis, vertical screw of variable diameter, similarity criteria.

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОРМОРАЗДАТЧИКА-СМЕСИТЕЛЯ-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Г. П. Водяницький, И. П. Слюсаренко,
В. В. Тымків

e-mail: grig40@gmail.com,
inna.slusarenko13@gmail.com
vvtymkiv@gmail.com

Житомирский национальный
агроэкологический университет
бульвар Старый, 7, г. Житомир, 10002, Украина

Моделирование технической системы является одним из первых этапов познания ее свойств с целью дальнейшего совершенствования и грамотного использования. Смешивания твердых компонентов с одновременным их измельчением вертикальным

коническим шнековым рабочим органом является сложным рабочим процессом, который авторы аналитически описали через основные параметры рабочего органа и режимы протекания процесса. Получены обобщенные факторы, благодаря чему количество факторов из семи уменьшилось до четырех. Это дает возможность сократить объем экспериментальной работы в восемь раз и обеспечить эффективные результаты, которые оценивают фактическое действие факторов, действующих на выбранный критерий эффективности, коэффициент неравномерности комплексно, а не врозь. Полученная модель позволяет сделать качественную и количественную оценки процесса работы кормораздатчика-смесителя-измельчителя, оптимизировать его параметры рабочих органов и режимы работы.

Установлено, что коэффициент неравномерности смеси зависит пропорционально (зависимость б) от частоты вращения шнека (ω) перемноженным на коэффициент (с), которые зависят, в свою очередь, от объема бункера (V), физико-механических свойств смеси, ее объемной массы

(ρ), касательного усилия сдвига компонентов смеси (τ) и шага шнека (e), уменьшенного в значение коэффициента c_2 , который зависит от конструкции бункера смесителя. Кроме того, на значение коэффициента неравномерности смеси (v') пропорционально также влияет скорость циркуляции компонентов, уменьшенная в c_3 раз, зависящая от конструктивных параметров машины и физико-механических свойств смеси, площади боковой поверхности шнека, уменьшенной в c_4 раз, что, в свою очередь, зависит от конструктивных параметров кормораздатчика-смесителя-измельчителя.

Результаты исследования используются при изучении студентами курсов «Машины и оборудование для животноводства», «Эксплуатация технологического оборудования для животноводства» и «Обоснование решений», могут быть основой дальнейшего исследования, а также в проектно-конструкторской практике.

Ключевые слова: смеситель-измельчитель, модель, безразмерный комплекс, анализ размерностей, вертикальный шнек переменного диаметра, критерии подобия.