

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 636.084.76

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/03>**Водяницький Г.П.**

Житомирський національний агроекологічний університет

Мамчур В.А.

Житомирський національний агроекологічний університет

Слюсаренко І.П.

Житомирський національний агроекологічний університет

Тимків В.В.

Житомирський національний агроекологічний університет

ДО МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ КОРМОРОЗДАВАЧА ЗМІШУВАЧА-ПОДРІБНЮВАЧА

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 із семи зменшилось до чотирьох. Це дає можливість скоротити обсяг експериментальної роботи у вісім разів та забезпечити ефективні результати, які оцінюють фактичну дію факторів, що діють на вибраний 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 (18) від частоти обертання шнека (ω) помноженого на коефіцієнт c_1 , який залежить від об'єму бункера (V), фізико-механічних властивостей суміші, її об'ємної маси (ρ та дотичного зусилля зсуву компонентів суміші (τ), кроку шнека (l), зменшеного на значення коефіцієнта c_2 , який залежить від конструкції бункера змішувача. Крім того, на значення коефіцієнта нерівномірності суміші (v') пропорційно впливає швидкість циркуляції компонентів, зменшена в c_3 разів, який залежить від конструктивних параметрів машини та фізико-механічних властивостей суміші, площі бокової поверхні шнека, зменшеної в c_4 разів, що залежить 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», можуть бути основою для подальшого дослідження та в проектно-конструкторській практиці.

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

Постановка проблеми. Змішування – це процес рівномірного перерозподілення компонентів в усьому об'ємі змішуваних матеріалів до стану рівномірної суміші. Однорідність суміші залежить від фізико-механічних властивостей компонентів, конструктивних рішень і 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 та подрібнення 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, 5, 7, 8, 11, 12].

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

В основу досліджень покладено фізичне та математичне моделювання [1, с. 12]. При моделюванні змішування сипких матеріалів використовують закони Фіка та математичну модель Нав'є-Стокса [1, с. 12]. Для кожного окремого випадку потоку сипких матеріалів на підставі положень [21] дослідники вибирають типові математичні моделі [1]: ідеального витіснення, ідеального змішування, дифузійну, коміркуву чи комбіновану моделі. Кожна з цих моделей має певні позитивні властивості і забезпечує її адекватність процесу змішування сипких матеріалів.

Використання моделей дає можливість описати явища змішування як 3-етапної 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, які 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 одночасно з етапом «мікропереміщення», або дифузії, коли компоненти проникають через межі макрооб'ємів, 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, с. 10], який погіршує коефіцієнт нерівномірності розподілу компонентів суміші, тобто впливає зворотньо на процес змішування. Як і дифузія, сегрегація залежить від фізико-механічних властивостей компонентів, а також залежить від конструкції та режимів роботи змішувача.

Слід зазначити, що результати досліджень [1, с. 12] процесу змішування сипких неоднорідних матеріалів одночасно з подрібненням вер-

тикальними шнековими конічними 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 компонентів за рахунок взаємодії компонентів з безперервно утворюючою обмежувальною стінкою з сипкої маси. Сучасний кормороздавач-змішувач забезпечений доскональними 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 дослідження є технологічна система змішування кормів, в якій засобом виробництва є вертикальний змішувач-подрібнювач зі змінним діаметром шнека з укріпленими ножами, а предметом дослідження – компоненти збалансованої суміші з різними фізико-механічними властивостями.

Для досягнення мети дослідження автори використовують метод моделювання, який дає змогу встановити закономірність процесу між визначальними та визначаючими критеріями. Ця задача належить до фізичних, в яких відсутній фундаментальний фізичний закон, який регулює процес, у цьому випадку змішування з подрібненням твердих матеріалів з різними фізико-механічними властивостями (задача другого виду) [14]. Вибираємо 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 рішення загальне і окремих частин та аналізуємо отриманий результат. Таким чином досліджуємо процес змішування і необхідні кінематичні показники змішувача-подрібнювача. Для спрощення та розв'язання отриманих залежностей приводимо диференціальні рівняння до критеріального вигляду за правилом інтегральних аналогів [6, 15]. При цьому зменшується кількість змінних, знижується складність і підвищується рівень загального опису фізичного процесу змішування.

Методика правила інтегральних аналогів полягає в тому, що необхідно вилучити 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 в рівняння, та перетворюємо отримані критерії подібності в іншу, більш зручну форму запису їх перемноженням, діленням, зведенням у ступінь чи множенням на постійний коефіцієнт [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 формалізованому 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 цього 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 $\frac{кг}{с}$;

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

t – час змішування, с; ω – частота обертання шнека, c^{-1} ;

l – крок шнека, м;

τ – дотичне напруження зсуву частинок корму, Па;

S – площа бокової поверхні витка шнека, m^2 .

При оцінці незалежних змінних враховуємо розмірні коефіцієнти та фізичні константи. Вибираємо 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 вибираємо величини V, ρ, τ . Перевіряємо правильність складених комбінацій або узагальнених параметрів [6]. Пам'ятаючи, що кожна комбінація є безрозмірною, кількість комбі-

націй має бути рівна $n-k$, тобто рівна різниці незалежних змінних (n) і вибраної кількості основних величин (k). Кожна змінна має зустрічатися в комбінаціях хоча б 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 переміщення компонентів суміші вздовж осі ($S = vt$) вверх, їх циркуляції в горизонтальній площині бункера-змішувача.

Фізична природа процесу змішування сипких матеріалів на підставі виконаних досліджень [1, ...12] та сучасної методики математичного моделювання [13, 14, 23] дають можливість описати цей процес диференціальним рівнянням першого порядку з відокремлюваними змінними:

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

яке описує низку подібних природних процесів. Рішення рівняння (2) виражає функція:

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

а з урахуванням початкових і граничних умов функція процесу цієї технологічної системи матиме такий вигляд при вірогідності $R^2 = 1,00$:

$$v = 0,998e^{-0,5t}, \quad (4)$$

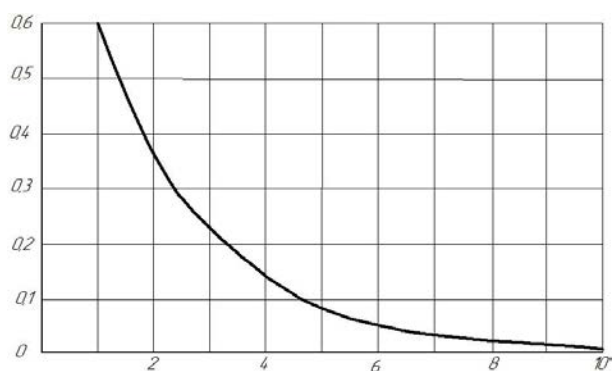


Рис. 1. Залежність коефіцієнта неоднорідності суміші в часі

Рівняння (2) адекватно описує процес роботи досліджуваної моделі ідеального змішування, оцінюючи якість перемішування коефіцієнтом нерівномірності на етапах конвективного та дифузійного змішування та на початку етапу сегрегації.

Коефіцієнт поступово та плавно знижується і за $t = 10$ 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, визначити параметри технічної системи, яка реалізує цей процес. Тому доцільним буде перетворення диференціального рівняння у критеріальне. Для цього використовуємо правило інтегральних аналогів [15]. Це правило дозволяє наблизити похибку рівняння до похибки вихідних даних, а при складності чи неможливості визначити фізичну величину, яка входить до складу критеріального рівняння, виконати її шляхом перемноження, ділення, піднесення в степінь 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 – тривалість, с;

v – лінійна швидкість суміші, м/с;

x – координата, м.

Записавши $\frac{dc}{dt} + v \frac{dc}{dx} = 0$ та прийнявши [15]

$$\varphi_1 = \frac{dc}{dt}, \text{ а } \varphi_2 = \frac{dc}{dx} \text{ та } \varphi_1 = \frac{c}{t}, \text{ а } \varphi_2 = \frac{c}{l}$$

і розділивши перший член на другий, отримаємо піднісши до степеня $a = -1$, отримаємо $\pi' = \frac{l}{vt}$ – критерій, який характеризує швидкість зміни концентрації контрольного компонента суміші.

Дифузійна модель відповідає потоку суміші з поршнеvim рухом:

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

де D_L – коефіцієнт повздовжнього перемішування.

Запишемо рівняння (6) у вигляді:

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

Приймаємо

$$\varphi_1 = \frac{dc}{dt}; \varphi_2 = v \frac{dc}{dx}; \varphi_3 = D_L \frac{d^2c}{dt^2}$$

відповідно до методики [15]

$$\varphi_1 = \frac{c}{t}; \varphi_2 = v \frac{l}{t}; \varphi_3 = D_L \frac{t}{l}.$$

$$\text{Отримаємо } \pi_1 = \frac{vt}{l} \text{ та } \pi_2 = \frac{D_L t}{l^2}.$$

Аналогічно при двопараметричній дифузійній моделі:

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

де D_R – коефіцієнт поперечного перемішування;

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

Після аналітичних перетворень отримаємо

$$\pi_1 = \frac{vt}{l}; \pi_2 = \frac{D_L t}{l^2}; \pi_3 = \frac{D_R t}{l^2}.$$

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:

$$\pi_1 = A \cdot \pi_2^a \cdot \pi_3^b, \quad (8)$$

де A – коефіцієнт пропорційності степенів;

a і b – показники степенів.

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 не враховують конструктивні параметри і режими роботи змішувачів, зокрема з вертикальним конічним шнеком, обладнаним ножами, який працює в обмеженому стінками сипкої маси просторі. Для складання співвідношень між параметрами і режимами роботи цієї технологічної системи і використаємо метод аналізу розмірностей.

На підставі другої теореми подібності [6, 16, 19] визначимо критерії подібності для критеріального рівняння на підставі рівняння (1). Розрахунок матриці розмірностей при $k = 3$ вибраних 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 напрям процесу, $k_{\pi} = m - k = 7 - 3 = 4$.

Запишемо коефіцієнт нерівномірності суміші через суттєві фактори:

Запишемо рівняння (6) у вигляді:

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

Приймаємо

$$\varphi_1 = \frac{dc}{dt}; \varphi_2 = v \frac{dc}{dx}; \varphi_3 = D_L \frac{d^2c}{dt^2}$$

відповідно до методики [15]

$$\dot{\varphi}_1 = \frac{c}{t}; \dot{\varphi}_2 = v \frac{l}{t}; \dot{\varphi}_3 = D_L \frac{t}{l^2}$$

Отримаємо $\pi_1 = \frac{vt}{l}$ та $\pi_2 = \frac{D_L t}{l^2}$.

Аналогічно при двопараметричній дифузійній моделі:

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

де D_R – коефіцієнт поперечного перемішування;

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

Після аналітичних перетворень отримаємо

$$\pi_1 = \frac{vt}{l}; \pi_2 = \frac{D_L t}{l^2}; \pi_3 = \frac{D_R t}{l^2}$$

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:

$$\pi_1 = A \cdot \pi_2^a \cdot \pi_3^b, \quad (8)$$

де A – коефіцієнт пропорційності степенів;
 a і b – показники степенів.

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 не враховують конструктивні параметри і режими роботи змішувачів, зокрема з вертикальним конічним шнеком, обладнаним ножами, який працює в обмеженому стінками сипкої маси просторі. Для складання співвідношень між параметрами і режимами роботи цієї технологічної системи і 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 $k = 3$ вибраних основних величин V, ρ, τ показує, що її визначник не рівний нулеві, $\Delta = -6$. Кількість узагальнених параметрів при $m=7$ суттєвих незалежних фак-

торів, які вагомо визначають напрям процесу, $k_n = m - k = 7 - 3 = 4$.

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 :

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

При певних значеннях показників a, b, c залежність (10) буде записано у вигляді безрозмірних комплексів. Для цього використовуємо метод нульових розмірностей і визначаємо значення a, b, c спочатку для лівої частини залежності (10) при умові вираження її безрозмірним комплексом величин. Для цього позначимо $\frac{dv}{dt}$. Тоді

$$\frac{v'}{V^a \cdot \rho^b \cdot \tau^c}, \quad (11)$$

Записуємо показники при однакових розмірностях, дотримуючись умови їх однорідності [6]:

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

Ця рівність буде справедливою, коли:

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

Розв'язуємо систему трьох рівнянь з трьома невідомими a, b, c і знаходимо $a = -\frac{1}{3}$; $b = -\frac{1}{2}$. Тоді ліва частина залежності (10) буде записана так:

$$\frac{v'}{v^{-\frac{1}{3}} \cdot \rho^{-\frac{1}{2}} \cdot \tau^{\frac{1}{2}}}$$

або після перетворення

$$\frac{v' \cdot \sqrt[3]{V}}{\sqrt{\tau} \cdot \sqrt{\rho}}, \quad (12)$$

Аналогічно перетворюємо складники правої частини залежності:

$$\frac{w}{V^{a_1} \cdot \rho^{b_1} \cdot \tau^{c_1}}, \quad (13)$$

Записуємо показники при однакових розмірностях:

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

Така рівність буде справедлива, коли:

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

Розв'язуємо систему трьох рівнянь з трьома невідомими а, b, с і знаходимо

$a = -\frac{1}{3}$; $b = -\frac{1}{2}$. Тоді ліва частина залежності (10) буде записана так:

$$\frac{\nu}{\nu^{\frac{1}{3}} \cdot \rho^{\frac{1}{2}} \cdot \tau^{\frac{1}{2}}}$$

або після перетворення

$$\frac{\nu \cdot \sqrt[3]{V}}{\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}}, \quad (12)$$

Аналогічно перетворюємо складники правої частини залежності:

$$\frac{w}{V^{a_1} \cdot \rho^{b_1} \cdot \tau^{c_1}}, \quad (13)$$

Записуємо показники при однакових розмірностях:

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

Така рівність буде справедлива, коли:

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

Розв'язуємо систему трьох рівнянь з трьома невідомими:

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

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

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

Тоді

$$\frac{\omega}{V^{a_1} \rho^{b_1} \tau^{c_1}} = \frac{\omega}{V^{\frac{1}{3}} \rho^{\frac{1}{2}} \tau^{\frac{1}{2}}} = \frac{\omega \sqrt[3]{V}}{\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}} = \omega \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}}, \quad (14)$$

Перетворюємо складник 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 при однакових розмірностях:

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

За умови, що:

$$\begin{cases} -b_2 - c_2 = 0, \\ 1 - 3a_2 + 3b_2 + c_2 = 0, \\ 2c_2 = 0, \end{cases} \quad c_2 = 0; \quad -b_2 = c_2 = 0; \quad 1 - 3a_2 + 0 + 0 = 0; \quad a_2 = \frac{1}{3}.$$

Тоді маємо:

$$\frac{l}{V^{a_2} \rho^{b_2} \tau^{c_2}} = \frac{l}{V^{\frac{1}{3}}} = \frac{l}{\sqrt[3]{V}}. \quad (15)$$

Перетворюємо складник ϑ правої частини залежності (10):

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

Записуємо показники при однакових розмірностях $M^{-b_3-c_3} M^{-b_3-c_3} L^{1-3a_3+3b_3+c_3} T^{-1+2c_3} = 1$ з умовою, що:

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

$$-b_3 = c_3, \quad b_3 = -\frac{1}{2}; \quad 2c_3 = 1, \quad c_3 = \frac{1}{2}; \quad 1 - 3a_3 + \frac{3}{2} - \frac{1}{2} = 0, \quad a_3 = \frac{2}{3}.$$

Тоді

$$\frac{\vartheta}{V^{a_3} \rho^{b_3} \tau^{c_3}} = \frac{\vartheta}{V^{\frac{2}{3}} \rho^{-\frac{1}{2}} \tau^{\frac{1}{2}}}$$

Запишемо вираз:

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

Записуємо показники при однакових розмірностях:

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

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

$$-b_4 = c_4, b_4 = 0; \quad 2c_4 = 0, c_4 = 0; \quad 2 - 3a_4 + 0 = 0, \quad a_4 = \frac{2}{3}.$$

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) буде записано через критерії подібності (узагальнені фактори):

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

Таким чином коефіцієнт нерівномірності суміші залежить пропорційно від частоти обертання шнека (w), помноженого на коефіцієнт

$$\sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}}$$

та кроку шнека (l), зменшеного в $\frac{1}{\sqrt[3]{V}}$; швидкості циркуляції частинок компонентів суміші (v) та площі бокової поверхні шнека (S), зменшеної в певну кількість разів.

При цьому коефіцієнт залежить від чотирьох визначаючих факторів, які комплексно діють на функцію, а не окремо. Такий підхід скорочує обсяг експериментальної роботи, дія меншого числа узагальнених факторів на функцію відображає системний реальний процес. Отримана модель є простою і доступною для подальшого аналізу та синтезу процесу змішування. Зв'язок між визначальними і визначаючими критеріями має такий вигляд, коли можна оцінити вплив окремих узагальнених факторів на визначальний критерій:

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

$$v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} = k_4 \left(\frac{S}{\sqrt[3]{V^2}} \right)^{x_4}.$$

Прологарифмуємо залежності (19):

$$\begin{aligned} 4 \lg(v \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}}) &= \lg k_1 + \lg k_2 + \lg k_3 + \lg k_4 \\ &+ x_1 \lg \left(w \cdot \sqrt[6]{\frac{V^2 \rho^3}{\tau^3}} \right) + x_2 \lg \left(\frac{l}{\sqrt[3]{V}} \right) + x_3 \lg \left(\frac{v}{\sqrt[6]{\frac{V^4 \tau^3}{\rho^3}}} \right) \\ &+ x_4 \lg \left(\frac{S}{\sqrt[3]{V^2}} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Виконуємо потенціювання та отримуємо:

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

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

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

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

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

Таким чином отримуємо критеріальне рівняння (21), в якому невідомими є показники степенів a, b, c, d . Коефіцієнти визначаємо експериментальним способом [18], використавши залежність (18). Коефіцієнти k_1, k_2, k_3, k_4 і показники степенів оцінюють вплив відповідних узагальнених факторів на коефіцієнт нерівномірності суміші.

Висновки. 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 змішування компонентів охарактеризувати процес диференціальними рівняннями, що дасть можливість оцінити адек-

ватність отриманої моделі, порівнюючи її з існуючими моделями [1, 2, 3, 5, 7]. Крім того, бажано оцінити техніко-економічний рівень кормороздавачів-змішувачів-подрібнювачів фірм світу для визначення перспективного технічного рішення.

Список літератури:

1. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов : учебник. Москва : Машиностроение, 1973. 216 с.
2. Стренк Ф.П. Перемешивание и аппараты с мешалками : учебник. Ленинград : Химия, 1985. 384с.
3. Кукта Г.М. Оптимальная продолжительность смешивания компонентов комбикормов. Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1971 (№ 11). С. 74–79.
4. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм : учебник. Ленинград : Колос, 1978. 560 с.
5. Дереза О.О., Дереза С.В. Аналіз методів моделювання процесу змішування кормів. Науковий вісник ТДАТУ. 2014. № 4, том 1. С. 95–101.
6. Гухман А.А. Введение в теорию подобия : учебник. Москва : Высшая школа, 1973. 296 с.
7. Брюховецкий А.М., Боярский О.В. Моделирование процесса смешивания сыпучих компонентов у лопатевому змішувачі періодичної дії : монографія. Київ : Урожай, 1994. 136 с.
8. Рудь А.В., Евстратова Н.Н., Белоусов К.Ю. Различные подходы к моделированию процесса движения материала в вертикальном винтовом конвейере. Сб. научн. тр. Sworld. 2013. № 4, том 1. С. 68–74.
9. Ісаєнко А.М., Качан Ю.Г., Іванов В.І. Про моделювання сегрегації руди під час руху похилою поверхнею: математичне моделювання. 2007. № 1. С. 33–39.
10. Непочатов Д.М., Русалев А.М., Бойко И.Г. Сводообразование сыпучих кормов и методика его определения. Вісник ХТНУСГ. 2011. № 108. С. 223–230.
11. Гевко І.Б., Калаціна Ю.Б., Левенець В.Д. Змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами : міжвузівський збірник ЛДТУ. 2002. № 11. С. 75–83.
12. Чвартакський Р.І. Обґрунтування параметрів машин для подрібнення і змішування кормів : дис. д-ра техн. наук. / Нац. техн. унів. ім. Полія. Тернопіль, 2017. 454 с.
13. Пономарев К.К. Составление дифференциальных уравнений : учебник. Москва : Высшая школа, 1973. 560 с.
14. Полюхович Н.В. Методические основы обучения студентов решению прикладных задач по теме: «Дифференциальные уравнения». Ярославский педагогический вестник. 2010. № 2. С. 131–139.
15. Гліненко Л.К., Сухонос О.Г. Основи моделювання технічних систем : монографія. Львів : Бескет Біт, 2003. 173 с.
16. Шенк Х. Теория интегрального эксперимента : учебник. Москва : Мир, 1972. 381 с.
17. Хмельовский В. Обґрунтування параметрів бункера кормоприготувального агрегату. Техніка і технології АПК, 2013. № 6. С. 13–15.
18. Басаргін В.А., Водяницький Г.П., Тимків В.В. Визначення технічного рівня кормороздавачів-змішувачів фірми світу. Тваринництво України. 2017. № 3-4. С. 10–13.
19. Грабар І.Г., Водяницький Г.П. Теорія і технологія наукових досліджень. Електронний навч. Посібник, 2013. Вип. 1. URL: http://igseiense.com/content/images/boons/teoriya_ta_technologiya-nauk-doslidzhen.pdf. (дата звернення: 05.02.2013).
20. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности : учебник. Ленинград : ГСХЧ, 1963. 416 с.
21. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирование : учебник. Москва : Высшая школа, 1984. 439 с.
22. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры : учебник. Москва : Машиностроение. 1972. 248 с.

Vodyanitsky G.P., Mamchur V.A., Slyusarenko I.P., Tymkiv V.V. TO THE METHOD OF SIMULATING THE WORKING PROCESS OF THE FEEDER OF THE MIXER-SHREDDER

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 18) on the speed of the screw (ω) multiplied by the coefficient c_1 , which depends in turn on the volume of the bunker (V), the physicomachanical 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.

Key words: *mixer grinder; model, dimensionless complex, dimension analysis, vertical screw of variable diameter, similarity criteria.*