DOI 10.32782/2078-0877-2025-25-1-7
УДК 631.313.6

С. П. Степаненко[1], д-р техн. наук ORCID: 0000-0002-8331-4632
Б. І. Котов[2], д-р техн. наук ORCID: 0000-0001-6369-3025
Д. А. Волик[1], аспірант ORCID: 0009-0001-1979-861X
В. А. Мельник[1], аспірант ORCID: 0009-0006-2383-9572

[1] *Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України*
e-mail: stepanenko_s@ukr.net

[2] *Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»*

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРАЦІЙНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗЕРНІВКИ ДЕКОЮ З ПУЛЬСУВАЛЬНИМ ПОВІТРЯНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Анотація. Сучасне агропромислове виробництво України потребує нових, більш ефективних машин для очищення зернового вороху та фракціонування зерна. Більшість зерноочисних машин, які пропонуються промисловістю, працює на основі зворотно-поступального руху решітних станів. Проте продуктивність таких машин значно нижча порівняно з тими, де під решітний стан подається повітряний потік, а в нашому випадку – пульсувальний повітряний потік. Водночас точна траєкторія руху зернового матеріалу безпровальним решетом залишається недостатньо вивченою. За частот обертання в межах n = 600 об/хв на початковій стадії руху зернини по решету вона спочатку здійснює синусоїдальний рух, який потім переходить у експоненціальне підвищення. На основі проведених розрахунків установлено, що за низької частоти обертання час перебування зернового матеріалу на решеті скорочується, а за максимальної – збільшується через малу відстань між вершинами синусоїди, що підвищує імовірність рекомбінації зернівок за висотою шару матеріалу на поверхні безпровального решета. Зміна кута нахилу відносно поздовжньої осі решета також сприяє збільшенню пропускної здатності та покращенню якості розподілу зернового матеріалу.

Ключові слова: безпровальне решето, зернина, траєкторія, пульсувальне повітряне середовище, післязбиральна обробка.

Постановка проблеми. Післязбиральна обробка та зберігання зерна вимагають значних витрат, пов’язаних із його виробництвом. Найбільш критична ситуація спостерігається в насіннєвій галузі, де забезпеченість господарств машинами для вторинного очищення становить близько 12 % від необхідної [1–3]. Для вирішення цієї проблеми необхідно вдосконалювати технології та технічні засоби, підвищуючи їхню продуктивність із забезпеченням якості. Широке впровадження сучасних перспективних зерноочисних машин сприятиме зменшенню витрат на обробку зерна [2; 3].

Одним із найбільш поширених сепарувальних елементів для вторинного очищення зерна є пробивні та безпровальні решета. Найбільш використовуваними вважаються полотна з прямокутними отворами, які розподіляють насіння за товщиною. Такі решета мають значно вищу питому продуктивність порівняно з решетами з круглими отворами. Однак вони мають і значні недоліки. Сучасні решета та кінематика їхнього руху не сприяють орієнтації частинок зернової суміші відносно отворів. Безпровальне решето в машині діє як вібраційний транспортер, а коливання решітних станів супроводжуються значними динамічними навантаженнями, що спричиняють підвищення рівня вібрації рами і, як наслідок, зниження надійності машин, що збільшує тривалість післязбиральної обробки зерна [4–6].

Машини зі зворотно-поступальними коливаннями решітних станів допомагають знизити динамічні навантаження та зменшити вплив вібрації [5–9]. Тому комбіноване поєднання в сепарувальній системі плоских безпровальних решет, розташованими під кутом, і раціонального режиму коливань решета, разом із підведенням пульсувального повітряного потоку під решето, може підвищити продуктивність зерноочисних машин та збільшити їхню експлуатаційну надійність [6–9].

Теоретичні дослідження вібраційних процесів розпочалися ще на початку минулого століття, проте ці процеси настільки складні та неоднозначні, що немає єдиної математичної моделі, яка б адекватно описувала поведінку матеріалу під впливом вібрації. Історично всі наявні моделі поведінки зернистого матеріалу під дією вібрації можна поділити на дві основні групи. Моделі одиничної частинки розглядають зернистий матеріал як дискретне середовище, де кожна частинка рухається незалежно від інших або взаємодіє з ними мінімально. Моделі суцільного середовища сприймають зернистий матеріал як єдину неперервну масу, що рухається специфічно під впливом коливань [1; 2].

У нашому випадку, коли товщина шару невелика ($h \leq 20d$, де d – діаметр частинки), його можна моделювати за допомогою моделі одиничної частинки [3].

Аналіз літературних джерел. Процесу розділення зерна досліджувала низка закордонних та вітчизняних учених. Зокрема, у роботі [2] приведену модель процесу сепарації посівного матеріалу дрібнонасіннєвих культур на циліндричному коміркoвому трієрі створено за допомогою STAR-CCM+. Візуалізація процесу залежала від фізико-механічних властивостей зерен, частоти обертання, діаметра трієра та кількості домішок у суміші. Чисельне моделювання дало змогу визначити залежності між продуктивністю сепаратора, умістом домішок і параметрами роботи трієра.

У роботі [4] розглядається, як для підвищення ефективності очищення їстівного соняшнику розроблено очисний пристрій з віброситом. Аналіз з використанням FLUENT-DEM визначив вплив швидкості повітряного потоку, частоти та амплітуди вібрації на очищення. Валідаційні тести підтвердили надійність моделювання й конструкції пристрою з похибкою результатів менш ніж 5 %.

Дослідження [5] показало, що модернізація зернозбирального комбайна додатковим бункером є ефективним рішенням, яке дає змогу одночасно збирати зерно та качани без втрат і зі збереженням якості. Створено дослідний зразок з оновленими компонентами, як-от збільшені отвори в соломотрясі, шнек, очисний вентилятор із ножами тощо. Тестування підтвердило ефективність системи із чистотою качанів 94,4–96,0 %.

Дослідження [7] встановило ключові фактори, що впливають на блокування отворів, зокрема фізико-механічні властивості частинок, конструкцію отворів і параметри шару матеріалу. Для сипких матеріалів біологічного походження, як-от пшениця, гречка, горох і кукурудза, визначено залежності сили зчеплення від вологості, форми та товщини шару. Аналітичні рівняння дають змогу прогнозувати необхідну потужність для розблокування отворів за допомогою систем очищення (щіток, ударних елементів). Отримані результати сприяють оптимізації параметрів очищення для різних типів матеріалів та отворів.

Формулювання мети статті. Розробити та дослідити математичну модель переміщення зернового матеріалу безпровальним решетом з урахуванням впливу пульсувального повітряного потоку, визначити залежності траєкторії руху зерна від частоти обертання решета, а також оцінити вплив додаткових робочих органів і кута нахилу решета на ефективність очищення та фракціонування зернового вороху.

Виклад основного матеріалу. Моделлю систем з вібраційно зміненим тертям є модель плоскої частинки, що розміщена на вібрувальній шорсткій поверхні, розташованій під певним

кутом до горизонту (рис. 1). За відсутності коливань частинка залишається нерухомою відносно поверхні, проте з появою вібрацій на похилій поверхні частинка починає рухатися вниз. Це пояснюється зменшенням тертя в напрямку лінії найбільшого нахилу поверхні [4–8].

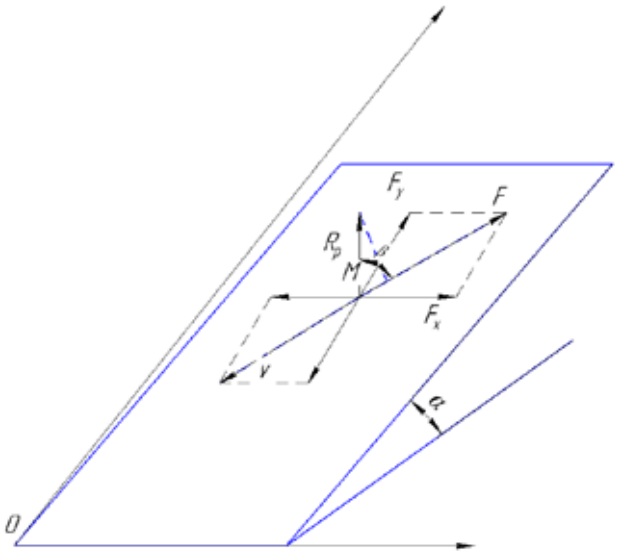

Рис. 1. Розрахункова схема руху зернівки вібрувальною декою при накладеному пульсувальному повітряному середовищі

Розглянемо динаміку частинки, розташованої на похилій шорсткій поверхні. Площина здійснює коливання за законом (рис. 1):

$$\mu = A\sin[\omega t] \tag{1}$$

де A – амплітуда, ω – кутова частота коливань похилої поверхні.

Повітряний потік (пульсувальний) здійснює коливання за законом:

$$\delta = 1 - \sin(\omega_1 \cdot t) \tag{2}$$

де ω_1 – кутова частота коливань повітряного потоку.

Диференціальні рівняння руху частинки записують у такому вигляді [4]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + mfg\cos(\alpha)\frac{\dot{x}}{\sqrt{(\dot{x})^2+(\dot{y})^2}} = mA\omega^2\sin[\omega t] + k_p\cdot\left(V_{pn}\cdot[1-sin(\omega_1\cdot t)]\right)^2\cos(\beta) \\ \ddot{y} + mfg\cos(\alpha)\frac{\dot{y}}{\sqrt{(\dot{x})^2+(\dot{y})^2}} = mg\sin(\alpha) + k_p\cdot\left(V_{pn}\cdot[1-sin(\omega_1\cdot t)]\right)^2\sin(\beta) \\ \sqrt{(\dot{x})^2+(\dot{y})^2} \neq 0 \end{cases} \tag{3}$$

де f – коефіцієнт тертя між частинкою та поверхнею;

α – кут нахилу поверхні до горизонту;

β – кут нахилу сили опору до поверхні;

k_p – коефіцієнт вітрильності, $k_p = \frac{g}{V_{\text{віт}}^2} = \xi(Re)\cdot\rho\cdot\frac{S_м}{2\cdot m}$ [3, 5];

V_{pn} – швидкість повітряного потоку;

g – прискорення вільного падіння.

Проведемо модифікації цієї системи диференціальних рівнянь, поділивши кожен член на добуток $mA\omega^2$.

Тоді система матиме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\ddot{x}}{A\omega^2} + \frac{fg\cos(\alpha)}{A\omega^2}\frac{\dot{x}}{\sqrt{(\dot{x})^2+(\dot{y})^2}} = \sin[\omega t] + \frac{k_p\cdot\left(V_{pn}\cdot[1-sin(\omega_1\cdot t)]\right)^2}{A\omega^2}\cos(\beta) \\ \frac{\ddot{y}}{A\omega^2} + \frac{fg\cos(\alpha)}{A\omega^2}\frac{\dot{y}}{\sqrt{(\dot{x})^2+(\dot{y})^2}} = \frac{g}{A\omega^2}\sin(\alpha) + \frac{k_p\cdot\left(V_{pn}\cdot[1-sin(\omega_1\cdot t)]\right)^2}{A\omega^2}\sin(\beta) \\ \sqrt{(\dot{x})^2+(\dot{y})^2} \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

Введемо безрозмірні величини:

$$u = \frac{\dot{x}}{A\omega};\ \vartheta = \frac{\dot{y}}{A\omega}; \quad (5)$$

$$\dot{u} = \frac{\ddot{x}}{A\omega^2};\ \dot{\vartheta} = \frac{\ddot{y}}{A\omega^2}; \quad (6)$$

$$\tau = \omega t;\ \tau_1 = \omega_1 t;\ X = \frac{x}{A};\ Y = \frac{y}{A}; \quad (7)$$

$$z = \frac{fg\cos(\alpha)}{A\omega^2};\ \xi = \frac{\sin(\alpha)}{f\cos(\alpha)} = \frac{\tan(\alpha)}{f};\ \mu = \frac{k_p\cdot\left(V_{pn}\right)^2}{A\omega^2}. \quad (8)$$

з урахуванням яких рівняння (4) набудуть такого вигляду:

$$\begin{cases} \dot{u} + z\frac{u}{\sqrt{u^2+\vartheta^2}} = \sin[\tau] + \mu[1-sin(\tau_1)]^2 \\ \dot{\vartheta} + z\frac{\vartheta}{\sqrt{u^2+\vartheta^2}} = z\xi + \mu[1-sin(\tau_1)]^2 \\ \sqrt{u^2+\vartheta^2} \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

Безрозмірна система нелінійних диференціальних рівнянь (9) не має точного аналітичного рішення. Вона може бути розв'язана лише чисельними методами. Зернівка при цьому здійснює прямолінійні коливання без відриву в горизонтальній площині. Система (9) розв'язана нами за допомогою програми MathCAD, яка використовує відповідний алгоритм. Як приклад наводимо графіки залежностей безрозмірних швидкостей зернівки по осях *x* і *y* від параметра безрозмірного часу, які представлені на рис. 2 – рис. 4.

Як видно з рис. 2, середнє значення безрозмірної швидкості частинки вздовж осі *x* дорівнює 0, тому вводиться поняття «ефективне значення швидкості» по осі *x*. Ефективне (дійсне) значення швидкості по осі *x* – це величина середньої швидкості вздовж цієї осі, яка виконає таку ж роботу, як і розглянута швидкість по осі *x* за один період:

$$u_e(\tau) = \sqrt{u^2}; \quad (10)$$

де $u_e(\tau)$ – дійсне значення безрозмірної швидкості по осі *x*;
u – безрозмірна швидкість частинки вздовж осі *x*.

Для визначення середнього ефективного значення безрозмірної швидкості по осі x використовується рівняння [ ]:

$$u_{sx} = \sqrt{\frac{1}{\tau}\int_0^{\tau}[u_{ex}(\tau)]^2 d\,\tau}; \quad (11)$$

а для розрахунку безрозмірної середньої швидкості по осі *y* застосовуємо формулу [ ]:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2}m = \sum_{i=1}^{n} F_{xi} \\ \frac{d^2y}{dt^2}m = \sum_{i=1}^{n} F_{yi} \\ \frac{d^2z}{dt^2}m = \sum_{i=1}^{n} F_{zi} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Сили, що діють на зернівку в системі координат Oxyz, де вісь Oz проходить через вісь електродвигуна, містять такі:

– рушійна сила (F_R): відповідає за переміщення зернівки по безпровальному решету;

– сила опору пульсувального повітряного потоку (F_P): опирається руху зернівки в пульсувальному повітряному середовищі;

– сила тяжіння зернівки (F_G): визначає вагу зернівки, яка діє вертикально вниз;

– сила тертя (F_T): опирається руху зернівки по поверхні решета.

Розглянемо кожну із цих сил окремо.

Рушійна сила. Оскільки вал електродвигуна обертається з постійною кутовою швидкістю ω, то кут повороту кривошипа можна виразити як $\varphi = \omega t$. Відповідно, переміщення зернівки по осях координат можна записати так:

По осі *x*:

$$x(t) = R\cos[\omega t] \tag{13}$$

По осі *y*:

$$y(t) = R\sin[\omega t] \tag{14}$$

По осі *z* (якщо враховувати вертикальне зміщення):

$$z(t) = z_0.$$

де R – радіус кривошипа;

ω– кутова швидкість;

t – час;

z_0 – початкове вертикальне положення зернівки.

Ці рівняння описують траєкторію руху зернівки під дією рушійної сили в системі координат Oxyz.

Щоб знайти проєкції переносної швидкості, необхідно продиференціювати переміщення по кожній осі за часом.

$$V_x = -\omega R\sin[\omega t] \tag{15}$$

$$V_y = \omega R\cos[\omega t] \tag{16}$$

Щоб знайти переносні прискорення, потрібно продиференціювати отримані рівняння для швидкостей ще раз за часом.

$$a_x = -\omega^2 R\cos[\omega t] \tag{17}$$

$$a_y = -\omega^2 R\sin[\omega t] \tag{18}$$

На основі отриманих проєкцій переносного прискорення можна записати рівняння рушійної сили в матричній формі:

$$F_R = m\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = m\begin{pmatrix} -\omega^2 R\cos[\omega t] \\ -\omega^2 R\sin[\omega t] \\ 0 \end{pmatrix} \tag{19}$$

Сила опору пульсувального повітряного потоку (F_P) за аналогією з рушійною силою [11]:

$$F_P = \begin{pmatrix} \xi(Re)\cdot\rho\cdot\frac{S_м}{2\cdot m}\cdot\left(V_{pn}\cdot[1-sin(\omega_1\cdot t)]\right)^2\cdot\cos(\beta) \\ \xi(Re)\cdot\rho\cdot\frac{S_м}{2\cdot m}\cdot\left(V_{pn}\cdot[1-sin(\omega_1\cdot t)]\right)^2\cdot\sin(\beta) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{20}$$

де $S_м = \frac{\pi d^2}{4}$ – площа міделевого перетину зернівки;
$d = 2 \cdot r$ – діаметр кульової зернівки, м;
ρ – густина повітря, кг/м^3;
ξ(*Re)* – коефіцієнт аеродинамічного опору, який залежить від критерію Рейнольдса $Re = \frac{du}{\nu}$ [20];
ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м^2/с;
u – швидкість обтікання частинки, м/с.

Сила тяжіння F_G діє вниз вздовж осі Oz, і її величина дорівнює $F_G = mg$, де m – маса зернівки, а g – прискорення вільного падіння. Враховуючи, що сила тяжіння спрямована протилежно осі Oz, можна записати рівняння для цієї сили в матричній формі в такому вигляді:

$$F_G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{pmatrix} \tag{21}$$

Сила тертя F_T залежить від нормальної сили й коефіцієнта тертя. Якщо сила тертя діє вздовж поверхні, то її можна виразити як:

$$F_T = \begin{pmatrix} mgf \sin[\omega t] \cos[\alpha] \\ -mgf \cos[\omega t] \sin[\alpha] \\ 0 \end{pmatrix} \tag{22}$$

де f – коефіцієнт тертя зернівки по безпровальному решету.

Двічі інтегруючи рівняння руху по часу (12) з підстановкою формул (13)–(14), можна отримати координати траєкторії руху зернівки в системі координат Oxyz. При цьому інтегрування вираження (12) дасть спочатку швидкість, а потім – положення зернівки:

$$\begin{cases} x(t) = \int\int \frac{F_{Rx}+F_{Px}+F_{Gx}+F_{Tx}}{m} dtdt \\ y(t) = \int\int \frac{F_{Ry}+F_{Py}+F_{Gy}+F_{Ty}}{m} dtdt \end{cases} \tag{23}$$

Для переходу до нової системи координат Ox′y′z′, орієнтованої щодо решета, необхідно використовувати матрицю повороту. Якщо система координат Oxyz – це початкова система, а Ox′y′z′ – нова система, яка орієнтована відносно старої на певний кут, то перетворення можна виконати за допомогою матриці повороту:

$$M_P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos[\alpha] & \sin[\alpha] \\ 0 & -\sin[\alpha] & \cos[\alpha] \end{pmatrix} \tag{24}$$

У новій системі координат Ox′y′z′ сили будуть записані з урахуванням повороту системи координат. Для цього застосуємо ті ж самі матричні перетворення, що й для координат, але тепер до векторів сил. Припустимо, що сили в початковій системі координат Oxyz записані як вектори. Для переходу до нової системи координат Ox′y′z′, орієнтованої під кутом α, необхідно використовувати матрицю повороту.

Рушійна сила:

$$F_R^* = F_R M_P \tag{25}$$

Сила тяжіння:

$$F_G^* = F_G M_P \tag{26}$$

Сила опору пульсувального повітряного потоку:

$$F_P^* = F_P M_P \tag{27}$$

Сила тертя:

$$F_T^* = F_T M_P \tag{28}$$

Після дворазового інтегрування виразу (12) по часу з підстановкою формул (25)–(28), можна отримати координати траєкторії зернівки в новій системі координат Ox′y′z′, яка прив'язана до решета. Це дасть змогу описати рух зернівки відносно решета, враховуючи всі сили та обертальні моменти.

$$\begin{cases} x^*(t) = \int\int \frac{F_{Rx}^* + F_{Px}^* + F_{Gx}^* + F_{Tx}^*}{m} dtdt \\ y^*(t) = \int\int \frac{F_{Ry}^* + F_{Py}^* + F_{Gy}^* + F_{Ty}^*}{m} dtdt \end{cases} \tag{29}$$

Під час виконання розрахунків у системі комп'ютерної алгебри Mathcad за рівняннями (23) і (29) були отримані графічні залежності (рис. 5), що ілюструють траєкторію руху зернівки. Відповідно до рівняння (23), основна тенденція графіка вказує на стійке збільшення, тоді як синусоїдальна компонента накладається на цей тренд, вносячи періодичні коливання, що змінюються в певних інтервалах часу.

Графіки представляють траєкторії в площинах *x* і *y*, де кожен графік відображає рух, що має плавне підвищення з одночасною синусоїдальною компонентою. Три графіки для кожної з координат (*x* і *y*) відрізняються лише значенням щільності насінини, що змінюється у вихідних даних. Для кожної з координат спостерігається подібна загальна тенденція: плавне зростання з періодичними коливаннями. Зі збільшенням щільності насінини траєкторії в обох площинах поступово піднімаються вище, що вказує на вплив цього параметра на рух. Порівняння графіків для координат x та y дає змогу оцінити, як зміна щільності насінини впливає на траєкторії в обох напрямках одночасно.

Висновки. Аналіз літературних джерел та власних досліджень показує, що вихідними величинами процесу безвідривного вібропереміщення частинки є середня безрозмірна швидкість по осі **y** та середнє ефективне значення швидкості по осі *x*.

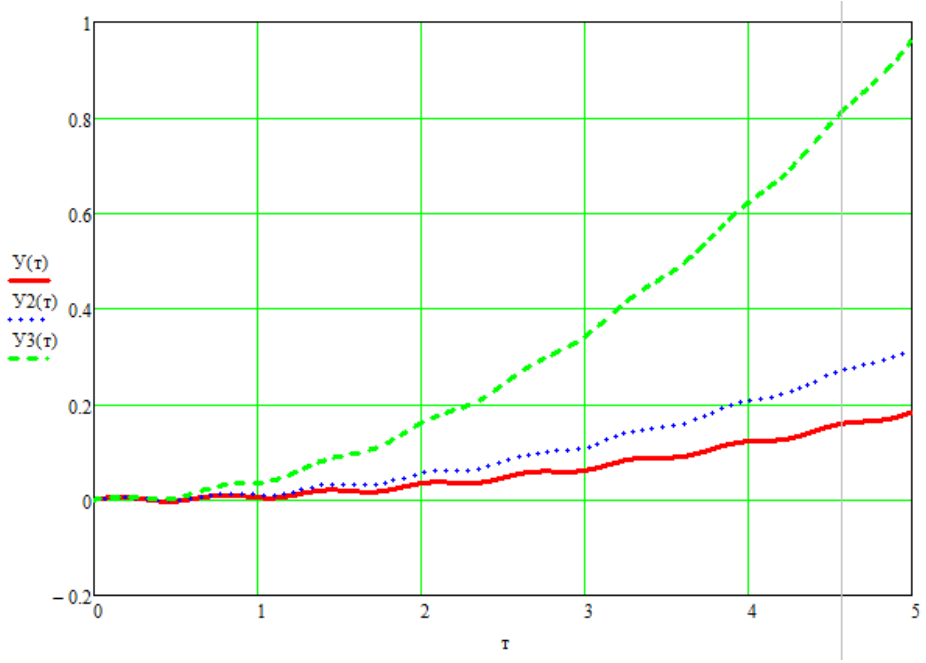

Рис. 2. Переміщення зернівки по решету в системі координат, розташованій у площині решета: 1 – щільність насінини пшениці ρ=1.8 г/см³; 2 – щільність насінини пшениці ρ=1.3 г/см³; 3 – щільність насінини пшениці ρ=1.0 г/см³

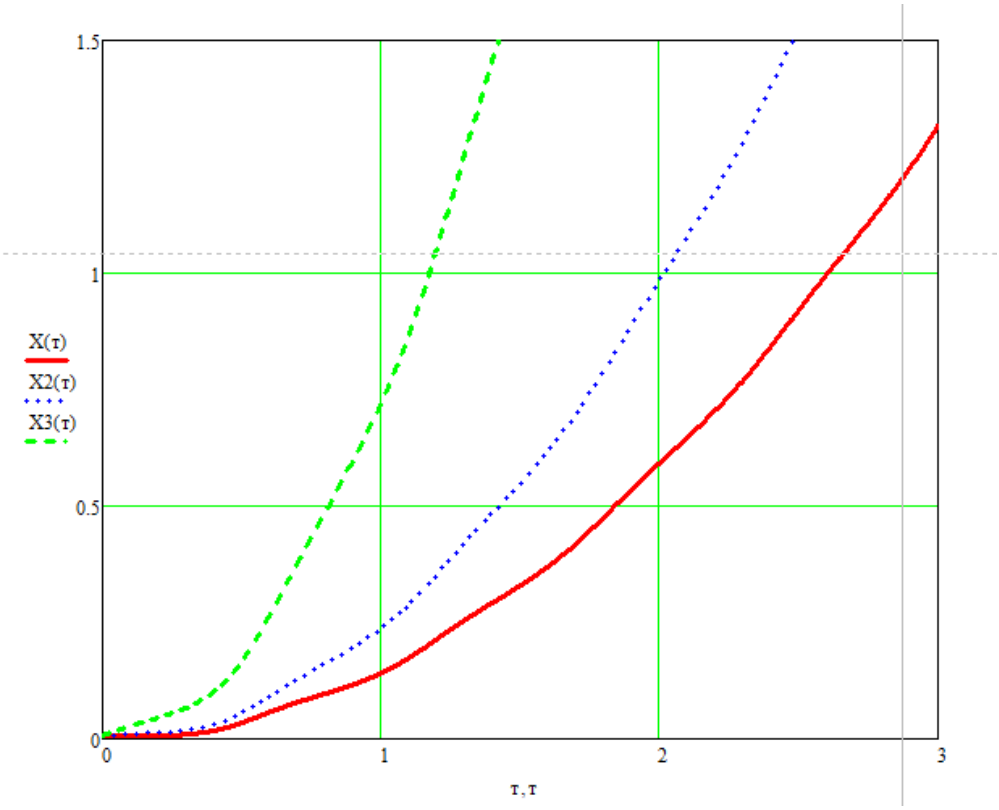

Рис. 3. Переміщення зернівки по решету в системі координат, розташованій у площині решета: 1 – щільність насінини пшениці ρ=1.8 г/см³; 2 – щільність насінини пшениці ρ=1.3 г/см³; 3 – щільність насінини пшениці ρ=1.0 г/см³

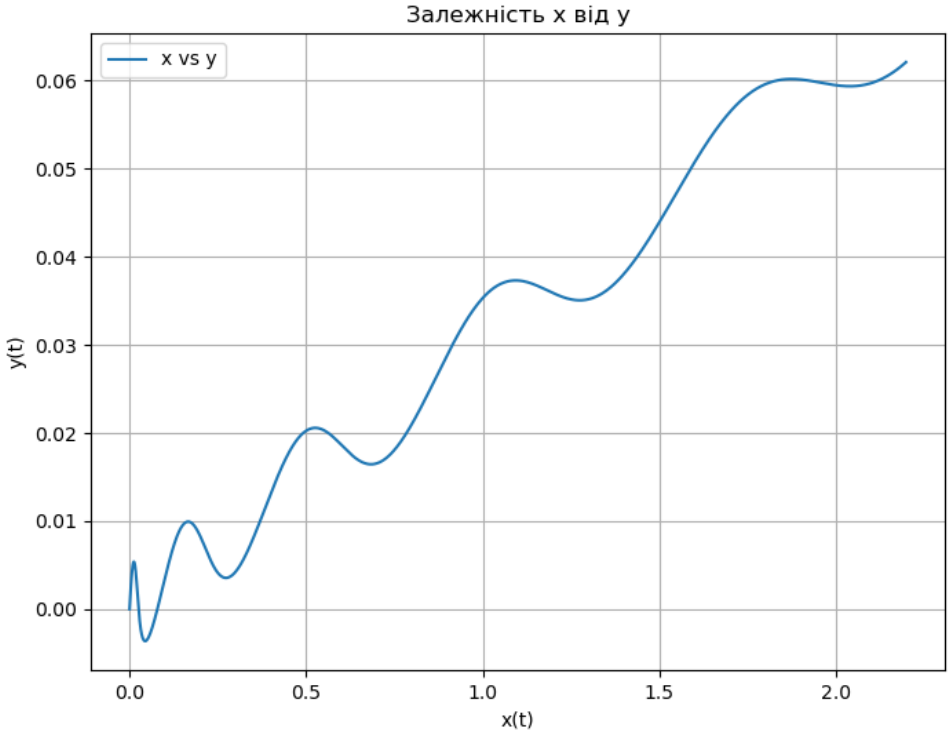

Рис. 4. Траєкторії переміщення зернівки: 1 – при частоті обертання решета 600 об/хв; (10 Гц)

1. При розв'язанні багатокритеріальної задачі оптимізації середньої безрозмірної швидкості частинки по осі **y** та середнього ефективного значення швидкості по осі **x** були отримані раціональні параметри (z = 0,1 – інтенсивність вібрації; ε=0,9 – параметр нахилу решета до горизонту), за яких досягаються максимальна продуктивність і максимальне значення просіювання зерна через решето.

2. Отримана математична модель відносного руху частинки по безпровальному решету при взаємодії зі штучним рифом, розташованим під кутом, що здійснює зворотно-поступальні коливання, дає змогу визначити траєкторію руху зернівки.

Установлено, що траєкторія руху зернівки має тенденцію щодо стійкого збільшення, тоді як синусоїдальна компонента накладається на цей тренд, вносячи періодичні коливання, що змінюються в певних інтервалах часу.

3. Така траєкторія підвищує імовірність перерозподілу зернівок за їх густиною на відповідній довжині решета, при цьому їх орієнтація щодо точки вивантаження змінюється в кілька разів швидше, ніж при іншому русі.

Список використаних джерел

1. Моделювання процесу переміщення зернового матеріалу в робочій зоні сепаратора С. П. Степаненко та ін. *Scientific bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*. 2024. Т. 14, № 1. URL: https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-3

2. Aliiev E., Lupko K., Kobets O. Development of Adaptive Seed-Separation Trier for Small-Seeded Crops. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry • Wood Industry • Agricultural Food Engineering*. 2023. P. 103–126. URL: https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.1.8

3. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. INMATEH / A. Nesterenko et al. *Agricultural Engineering*. 2017. No. 53(3). P. 65–70.

4. Design and Experimental Study of a Cleaning Device for Edible Sunflower Harvesting / X. Yang et al. *Agriculture*. 2024. Vol. 14, no. 8. P. 1344. URL: https://doi.org/10.3390/agriculture14081344

5. Design and initial testing of a maize cob collection system / B. Dolšak et al. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2024. Vol. 17, no. 3. P. 108–114. URL: https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20241703.8218

6. Design and Testing of a Pneumatic Grain Aspirator for Efficient Separation of Impurities / P. Greyvensteyn et al. *Proceedings of the 9th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'23)*. 2023. Vol. 141.

7. Design, Fabrication and Performance Evaluation of Wheat Grain Cleaner for Small-Scale Farmers. *Humanitarian and Natural Sciences Journal*. 2024. URL: https://doi.org/10.53796/hnsj59/2

8. Determination of Hole Blocking Conditions for Perforated Sifting Surfaces S. Kharchenko et al. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2024. Vol. 18, no. 5. P. 342–360. URL: https://doi.org/10.12913/22998624/190483

9. Identification of the Natural Frequencies of Oscillations of Perforated Vibrosurfaces with Holes of Complex Geometry / S. Kharchenko et al. *Materials*. 2023. Vol. 16, no. 17. P. 5735. URL: https://doi.org/10.3390/ma16175735

10. Improvement of particle separation performance by new type hydro cyclone / T. Yamamoto et al. *Separation and Purification Technology*. 2016. Vol. 158. P. 223–229. URL: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.12.020

11. Mathematical modeling of the process of movement of grain material on the surface of a sieve of a vibrating pneumatic pulse separator / S. Stepanenko et al. *Vibrations in engineering and technology*. 2023. No. 3(110). P. 22–34. URL: https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-3-3

12. Mathematical model, numerical simulation and optimization of rotating valve feeder in animal feed production / L. Pezo et al. *Animal Feed Science and Technology*. 2020. P. 114741. URL: https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114741

13. Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct / S. Kharchenko et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 10. P. 4383. URL: https://doi.org/10.3390/app11104383

14. Namdev S., D'souza P., Moses S. Estimation of some physical and mechanical characteristics of Wheat grain at definite moisture content. *Poljoprivredna tehnika*. 2024. Vol. 49, no. 1. P. 23–32. URL: https://doi.org/10.5937/poljteh2401023k

15. Performance evaluation of a new cyclone separator – Part II simulation results / W. Xu et al. *Separation and Purification Technology*. 2016. Vol. 160. P. 112–116. URL: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.01.012

16. Simulation and experiment of rice cleaning in air-separation device based on DEM-CFD coupling method X. Ma et al. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2020. Vol. 13, no. 5. P. 226–233. URL: https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201305.5225

17. Simulation and Optimization Experiment: Working Process of a Cleaning Device for Flax Combine Harvester / F. Dai et al. *Agriculture*. 2023. Vol. 13, no. 11. P. 2123. URL: https://doi.org/10.3390/agriculture13112123

18. Stepanenko S. P., Volyk D. A. Mathematical Modeling and the Results of Experimental Research of the Process of Density-Based Seed Separation Using Vibro-Pneumatic-Impulse Technology. *National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*. 2023. No. 53. P. 138–148. URL: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.138-148

19. Theoretical Aspects of Grain Separation on an Inertial-gravity Separator Sieve / P. Luzan et al. *National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*. 2021. No. 51. P. 95–103. URL: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.95-103

20. Volyk D. A., Popadyuk I. S., Stepanenko S. P. Analysis of constructions of technical means for separating seeds by density. *MECHANICS and AUTOMATICS of AGROINDUSTRIAL PRODUCTION*. 2023. № 2(116). С. 100–109. URL: https://doi.org/10.37204/2786-7765-2023-2-11

Стаття надійшла до редакції 10.02.2025 р.

S. Stepanenko[1], B. Kotov[2], D. Volyk[1], V. Melnyk[1]

Institute of Mechanics and Automatics of Agroindustrial Production of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine

NUMERICAL MODELING OF THE PROCESS OF VIBRATIONAL MOVEMENT OF GRAIN ON A DECK WITH A PULSATING AIR ENVIRONMENT

Summary

Modern agro-industrial production in Ukraine requires new, more efficient machines for cleaning grain mixtures and fractionating grain. Most grain cleaning machines offered by the industry operate based on the reciprocating motion of sieve frames. However, the productivity of such machines is significantly lower compared to those that utilize an airflow, particularly a pulsating airflow, beneath the sieve frame. At the same time, the exact trajectory of grain material movement across the air-permeable sieve remains insufficiently studied.

To evaluate the performance of a sieve frame executing reciprocating motion with the combined application of a pulsating airflow, a mathe matical model of grain movement across the sieve was developed. Depending on the sieve's rotational frequency, the trajectory may become eithe r shortened or elongated. At rotational frequencies around n=600 rpm, during the initial stage of grain movement across the sieve, the grain follows a sinusoidal trajectory that transitions into a smooth exponential rise. Based on the calculations performed, it was established that at lower rotational frequencies, the residence time of the grain material on the sieve decreases, while at maximum frequencies, it increases due to the short distance between the cycloidal cycles, the reby raising the probability of grain kernel recombination along the height of the material layer on the air-permeable sieve surface.

Additionally, during movement, the orientation of the grain relative to the sieve changes significantly faster when additional working elements, such as perforated ridges, are installed, compared to a purely reciprocating motion. Altering the inclination angle relative to the sieve's longitudinal axis furthe r contributes to increased throughput capacity and improved grain material distribution quality.

Keywords: air-permeable sieve, grain kernel, trajectory, pulsating airflow, post-harvest processing.