

УДК 631.308.8

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.206-216](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.206-216)

Б. І. Котов¹, В. Г. Мироненко², С. П. Погорілий³, проф., д-р техн. наук,
В. О. Грищенко³, Ю. І. Панцир¹, доц., канд. техн. наук

¹Подільський державний університет, Кам'янець-Подільський, Україна

²Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН України

³Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

e-mail: vlgr@nubip.edu.ua

Аналіз процесів вібропневмосепарації зернових матеріалів з точки зору завдань керування

У статті розглянуто шляхи підвищення ефективності процесу повітряно-решітної вібропневмосепарації зернових матеріалів шляхом використання пульсуючого повітряного потоку. Встановлено, що псевдозрідження зернового шару під дією коливань і повітряного тиску надає йому властивості в'язкої рідини, що дозволяє інтенсифікувати розшарування зернової маси за розміром, густиною та масою частинок. На основі теоретичних досліджень сформульовано аналітичні та напівемпіричні залежності, які описують взаємозв'язок швидкості занурення частинок із кінематичними та аеродинамічними параметрами процесу. Доведено доцільність застосування двоконтурної автоматизованої системи керування, яка забезпечує гнучке регулювання частоти коливань і параметрів подачі повітря.

математичне моделювання, віброзріджений шар, алгоритм, зерно, напівемпіричні залежності

Постановка проблеми. Вібропневмосепаратори широко використовуються для вторинної сепарації зерна та розділення насіннєвого матеріалу і видалення важковідокремлюваних домішок. Інтенсивне розшарування зернової маси на коливних поверхнях під дією полів сил тяжіння, інерції та тиску повітряного потоку сприяє переведення зернового шару зернового матеріалу у псевдозріджений стан і надає йому властивості в'язкої рідини, що дозволяє розділити компоненти за різними ознаками: розмір, вага, густина.

Основою підвищення ефективності сепарації (збільшення продуктивності чіткості поділу зернового потоку на компоненти) решітно-повітряних машин є суттєва інтенсифікація сепарації частинок різного розміру, маси і густини, і переміщення в псевдозрідженому шарі. Але наявність одночасної дії різних механічних і гідродинамічних впливів на зернову масу суттєво ускладнює забезпечення раціональних режимів перебігу процесу поділу.

Вірогіднісно-статистичний характер процесів повітряно-решітної-вібраційної сепарації зернових матеріалів зумовлює необхідність розробки і застосування автоматичної системи керування режимами поділу зернової суміші на окремі компоненти, які забезпечать максимальну продуктивність (пропускну здатність) і кондиційну якість продукту. При розробці (синтезу) системи автоматизованого керування важливим питанням є обґрунтуванням управляючих параметрів і регульованих показників.

В практиці автоматизації решітних машин знайшли застосування стабілізація завантаження решітної частини машини (навантаження на решето або опорну поверхню), а основним регулюючим параметром частота коливання решета. Але зміна частоти коливань приводить до зміни швидкості переміщення зерна і, відповідно, висоти шару зерна, що в свою чергу є збурюючим фактором. Тому для ефективного керування процесом вібропневмосепарації більш гнучке регулювання контрольованих параметрів з використанням декількох контурів регулювання і корекції установок регуляторів. Для

© Б. І. Котов, В. Г. Мироненко, С. П. Погорілий, В. О. Грищенко, Ю. І. Панцир, 2025

виявлення впливу зміни регулюючих параметрів на перебіг процесу переміщення та перерозподілу частинок у зерновому шарі необхідно сформулювати та дослідити математичні моделі переміщення частинок всередині шару і переміщення шару зерна вздовж опорної поверхні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні положення конструювання і результати розрахунків параметрів машин для сепарації зерна наведено у фундаментальній роботі [1]. Результати теоретичних і експериментальних досліджень віброповітряних машин для сепарації зерна висвітлені в монографіях [2-4]. Визначення діючих факторів, впливу силової взаємодії частинки і вібропневмозрідженого шару на переміщення частинки в шарі, наведено в роботі [5]. Там же дано спрощену методику побудови математичної моделі, що визначає швидкість переміщення частинки в шарі.

В зазначених роботах обґрунтовано високу ефективність застосування віброповітряної сепарації для розділення зернового матеріалу на вібраційних решетах за розміром і поділу зернової суміші за густиною на безпровальних решетах.

Прогресивним напрямком інтенсифікації процесів безрешітної сепарації зернових матеріалів слід вважати застосування пульсуючих повітряних потоків [6-9].

Використання пневмоімпульсних повітряних потоків для інтенсифікації перерозподілу частинок у шарі зерна має певні переваги для керування процесом поділу зерна, оскільки дає можливість здійснювати керуючий вплив шляхом зміни швидкості повітря та частоти коливань. Але застосування пульсуючих потоків на переміщення окремої зернівки у віброзрідженому шарі практично не розглядалось, також як і переміщення частинки вздовж віброуючої поверхні.

Постановка завдання. Визначити вплив кінематичних та аеродинамічних параметрів на переміщення частинки у вібропневмозрідженому шарі та вздовж опорної коливної поверхні.

Виклад основного матеріалу. Ступінь зрідження шару зерна під дією вібрацій та пульсацій повітряного потоку може бути оцінена за величиною швидкості занурення модельної частинки (відношенню глибини занурення до часу занурення). Цей параметр можна визначити експериментально, або розрахувати за попередньо сформульованою математичною моделлю. Оскільки на результати експерименту можуть діяти випадкові фактори, методикою дослідження передбачено аналітичне вирішення задачі і експериментальною перевіркою отриманих результатів досліджень. Швидкість занурення частинки визначається b занурення за час Δt .

За основу формулювання математичної моделі опису досліджуваного процесу прийнято фізико-механічну модель переміщення «товарної»-прохідної частки в коливному середовищі дисперсного (сипкого) матеріалу, густина частинок якої відрізняється від густини (m маси) частинки «товарної» фракції. Математичною формою моделі є рівняння відносного руху частинки у коливному (цільному) середовищі:

$$m_1 \frac{d\bar{v}}{dt} = m_0 (\Delta - 1) \left(g - \frac{d\bar{u}}{dt} \right) + F(\bar{V}) + \bar{R}(V), \quad (1)$$

де $\bar{V}$ – швидкість руху частинки відносно середовища, $\bar{u}$ – абсолютна швидкість середовища в точці, яка співпадає з центром тяжіння частинки (швидкість переносного руху), m_1, m_0 – маса частинки та маса середовища в об'ємі частинки, $\Delta = m/m_0 - m_1 = m' + m_0$ (де m' – приєднана маса), $F(\bar{V})$ – сили опору відносному руху частинки в середовищі, $\bar{R}(V)$ – сила тиску повітряного потоку.

Абсолютна швидкість незбуреного середовища, що контактує з частинкою задається функцією:

$$\bar{u} = A\bar{\omega} \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (2)$$

Сила опору середовища визначається як сила сухого тертя, спрямована в напрямку, протилежному відносній швидкості руху яка залежить від частоти і амплітуди коливань $F(\omega, A)$.

Сила опору повітряному потоку в першому наближенні:

$$\bar{R} = \xi(\text{Re}) \frac{S_m}{2} \rho_n (V - V_n)^2, \quad (3)$$

де ρ_n, V_n – густина та швидкість повітря, S_m – площа міделєвого перетину.

На рисунку 1. наведено схему силової взаємодії частинки з пневмовіброзрідженим шаром насінневої суміші.

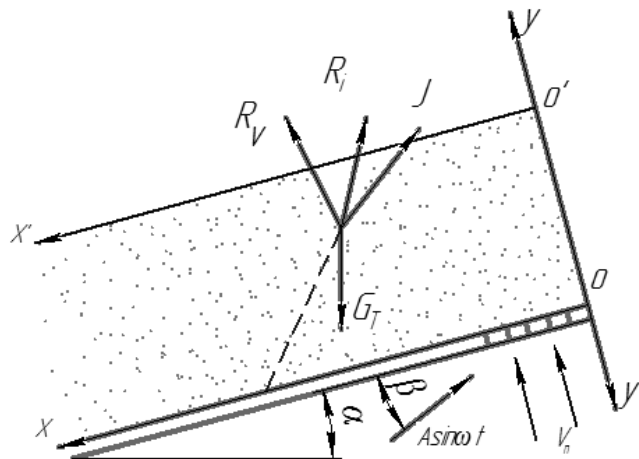


Рисунок 1 – Схема до розрахунку параметрів пневмовібраційного розрідження компонентів насінневого матеріалу

Джерело: розроблено авторами

Для процесу переміщення частинки в пневмовіброзрідженому шарі відповідно до схеми дій сил (рисунок 1) буде справедливе векторне диференціальне рівняння:

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{G}_m + \bar{J} + \bar{R}_c + \bar{R}_n. \quad (4)$$

У загальному випадку дека нахилена до горизонту під кутом α . Гармонійні коливання $A \sin \omega t$ спрямовані під кутом β до деки (рисунок 1.).

Використовуючи переносну систему координат XOY , жорстко зв'язану з вібраційною декою, та проектуючи рівняння (4) на відповідні осі OX , OY , в роботі [16] отримано систему диференціальних рівнянь, які описують переміщення частинки у вібропневмозрідженому шарі:

$$\begin{cases} \overline{m}\ddot{x} = \overline{m}g \sin \alpha \pm \overline{m}A\omega^2 \cos \beta \sin \omega t - R_x \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} - K_n(V_n - \dot{x})^2 \cos \gamma \\ \overline{m}\ddot{y} = \overline{m}g \cos \alpha \pm \overline{m}A\omega^2 \sin \beta \sin \omega t - R_y \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} - K_n(V_n - \dot{y})^2 \sin \gamma \end{cases}, \quad (5)$$

де $\overline{m} = m_0(\Delta - 1)$, $\dot{x} = dx/dt$, $\dot{y} = dy/dt$, $\ddot{x} = d^2x/dt^2$, $\ddot{y} = d^2y/dt^2$, K_n – коефіцієнт опору повітряного потоку, V_n – швидкість частинки в шарі, γ – кут нахилу повітряного потоку до деки.

Розв'язок системи нелінійних рівнянь у вигляді траєкторії частинки $x(y)$ можна отримати чисельним методом із використанням комп'ютерних програмних середовищ за визначених значень сили опору середовища переміщенню частинки R_x та R_y . Сили опору в різних напрямках руху частинки мають різні значення, бо, як відомо, під час накладення на шар зернівок некруглої форми окремі зернівки орієнтуються довгою віссю в напрямку руху [12].

Використовуючи коефіцієнт ефективної вібров'язкості й ототожнюючи рух тіла у вібропневмозрідженому шарі з рухом тіла та в'язкій рідині [11], силу опору можна визначити за законом Стокса, враховуючи незначні швидкості занурення частинки. Тоді

$$\overline{R}_{x,y} = 3\pi\mu_{ef}d_{x,y}\overline{V} = K_{cx,y}\overline{V}, \quad (6)$$

де $\mu_{ef}(A\omega_1^2) = f_1(\varepsilon)$ – коефіцієнт ефективної вібров'язкості, $\varepsilon = f_2(A\omega_1^2)$ – порозність вібропневмозрідженого шару, $d_{x,y}$ – еквівалентні діаметри частинки в проєкціях на осях ОХ, ОУ.

Враховуючи, що $V_n \gg V$, силу опору повітряного потоку визначимо за формулою:

$$R = K_n V_\phi, \quad (6a)$$

де $V_\phi = V_n/\varepsilon$ – швидкість обтікання (фільтрації), $K_n = \xi(\text{Re}) \frac{S\rho}{2m}$ – коефіцієнт опору

середовища (де $\xi(\text{Re}) = 13/\sqrt{d_k}$), $d_k = \frac{1}{3} \frac{d_\varepsilon \varepsilon}{1 - \varepsilon}$ – діаметр повітряного каналу в шарі зерна.

З урахуванням (6a) систему рівнянь (5) можна записати у вигляді лінійних диференціальних рівнянь другого порядку. Приймаючи, що $V_n \gg V_x, V_y$, матимемо:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + K_{cx} \frac{dx(t)}{dt} = -K_{nx} V_n^2 - G_{mx} + A_x \sin \omega t; \quad (7)$$

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + K_{cy} \frac{dy(t)}{dt} = -K_{ny} V_n^2 - G_{my} + A_y \sin \omega t, \quad (8)$$

де $K_{nx} = K_n \cos \frac{\gamma}{m}$, $K_{ny} = K_n \sin \frac{\gamma}{m}$, $G_{mx} = g \sin \alpha$, $G_{my} = g \cos \alpha$, $K_{cx} = K_{cy} = K_c/m$, $A_x = A\omega^2 \cos \beta$, $A_y = A\omega^2 \sin \beta$.

Величини коефіцієнтів K_{cx}, K_{cy}, K_n у першому наближенні можна визначити, використовуючи напівемпіричні залежності з роботи [13].

Сила опору визначена на основі аналізу впливу сил бокового тиску з боку частинок шару зерна та коефіцієнта внутрішнього тертя f під дією коливання середовища зі швидкістю $A\omega$:

$$R_c = \frac{6}{5} r^2 f_1 \rho_t (1 - \varepsilon (V_{n1} \omega^2 A)) \frac{V}{A\omega} h_i = K_{c\ x,y} \bar{V}; \quad (9)$$

$$\varepsilon = 0.293 \cdot 1.44^{V_n} \cdot 1.33^{A\omega^2}; \quad (10)$$

$$K_n = \frac{13S\rho}{2m} \left(\sqrt{\frac{1}{3} \frac{d_\varepsilon}{1-\varepsilon}} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Для визначення вихідних параметрів рівнянь (7), (8) густину середовища ρ_0 (або масу частинок середовища m_0), коефіцієнт опору середовища K_c та коефіцієнт опору повітряного потоку K_n за результатами експерименту використано методику [8] та експериментальну установку, що функціонує за схемою (рисунок 2), в якій пневмозріджений шар отримує гармонійні коливання $A \sin \omega t$ у горизонтальній площині ($\beta = 0$).

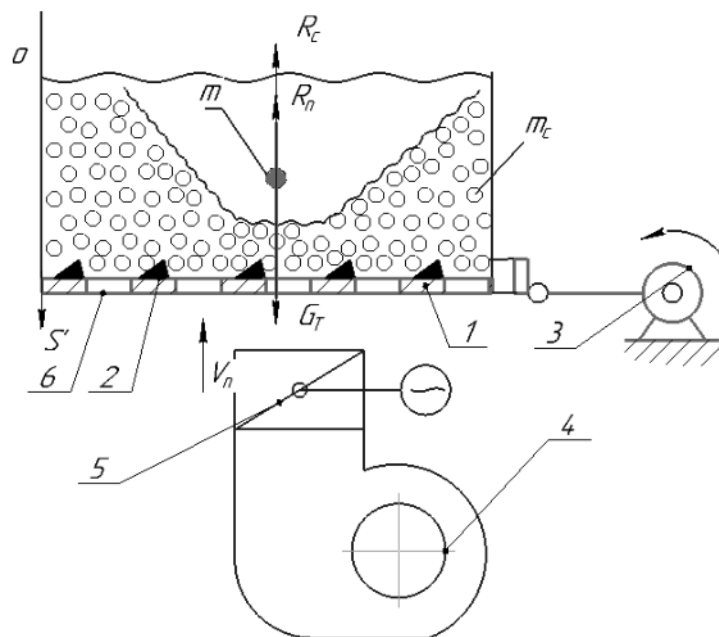


Рисунок 2 – Схема сил, що діють на частинку в пневмовіброзрідженому шарі:

- 1 – перфорована коливна дека; 2 – асиметричні рифи для надання шару матеріалу горизонтального переміщення; 3 – віброзбудник гармонійних коливань; 4 – вентилятор; 5 – пульсатор; 6 – перфоровані поверхні

Джерело: розроблено авторами

Горизонтальні коливання поверхні з рифами сприяють інтенсивному перерозподілу частинок за висотою шару, а дія повітряного тиску змінює орієнтацію частинок [4, 12] та величину площі міделевого перетину, яка впливає на опір.

Вертикальне переміщення частинки в пневмовібровзрідженому шарі можемо визначити використовуючи рівняння (7) (при $\beta = 0$, $\alpha = 0$) записане у вигляді:

$$m \frac{d^2 S'}{dt^2} + K_c \frac{dS'}{dt} = K_n V_\phi^2 - (\Delta - 1)m_0 g, \quad (12)$$

де S' – переміщення частинки у вертикальному напрямку (занурення), $\Delta = m_0/m$, K_c – коефіцієнт опору товарної частинки від взаємодії з окремими зернами (внутрішнє тертя), K_n – коефіцієнт опору повітряному потоку, що фільтрується через шар зерна.

Розв'язок рівняння за початкових умов $t = 0$, $S' = 0$, $dS'/dt = 0$, отримано у вигляді:

$$S'(t) = at + \frac{m}{K_c} a \left(1 - e^{-\frac{K_c}{m} t} \right), \quad (13)$$

$$\text{де } a = \frac{-K_n V_n + (\Delta - 1)m_0 g}{K_c}.$$

У рівнянні три невідомі: a , K_c , m_0 , які визначено числовим розв'язком системи рівнянь, складеної з рівняння (10), записаного для декількох проміжків часу t_i у вигляді $S'_i = f(t_i)$ (при $i \geq 3$) за методикою [8] (рисунк 3).

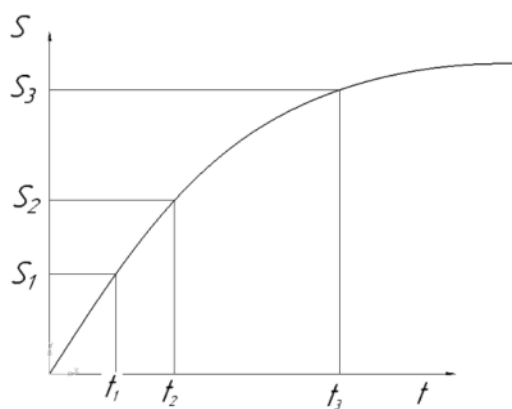


Рисунок 3 – Схема для розрахунку швидкості занурення

Джерело: розроблено авторами

Швидкість було визначено за очевидними співвідношеннями: $V_1 = S_1/t_1$, $V_2 = (S_2 - S_1)/(t_2 - t_1)$, $V_3 = (S_3 - S_2)/(t_3 - t_2)$, ...

За означеною схемою та методикою [8], використовуючи експериментальні дані роботи [11] визначено коефіцієнти K_c та K_n в залежності від частоти коливань опорної поверхні (решета) і швидкості повітря (під решетом). На графіках (рисунк 4) наведено залежності $K_c(\omega)$, $K_c(V_n)$ та $K_n(V_n)$.

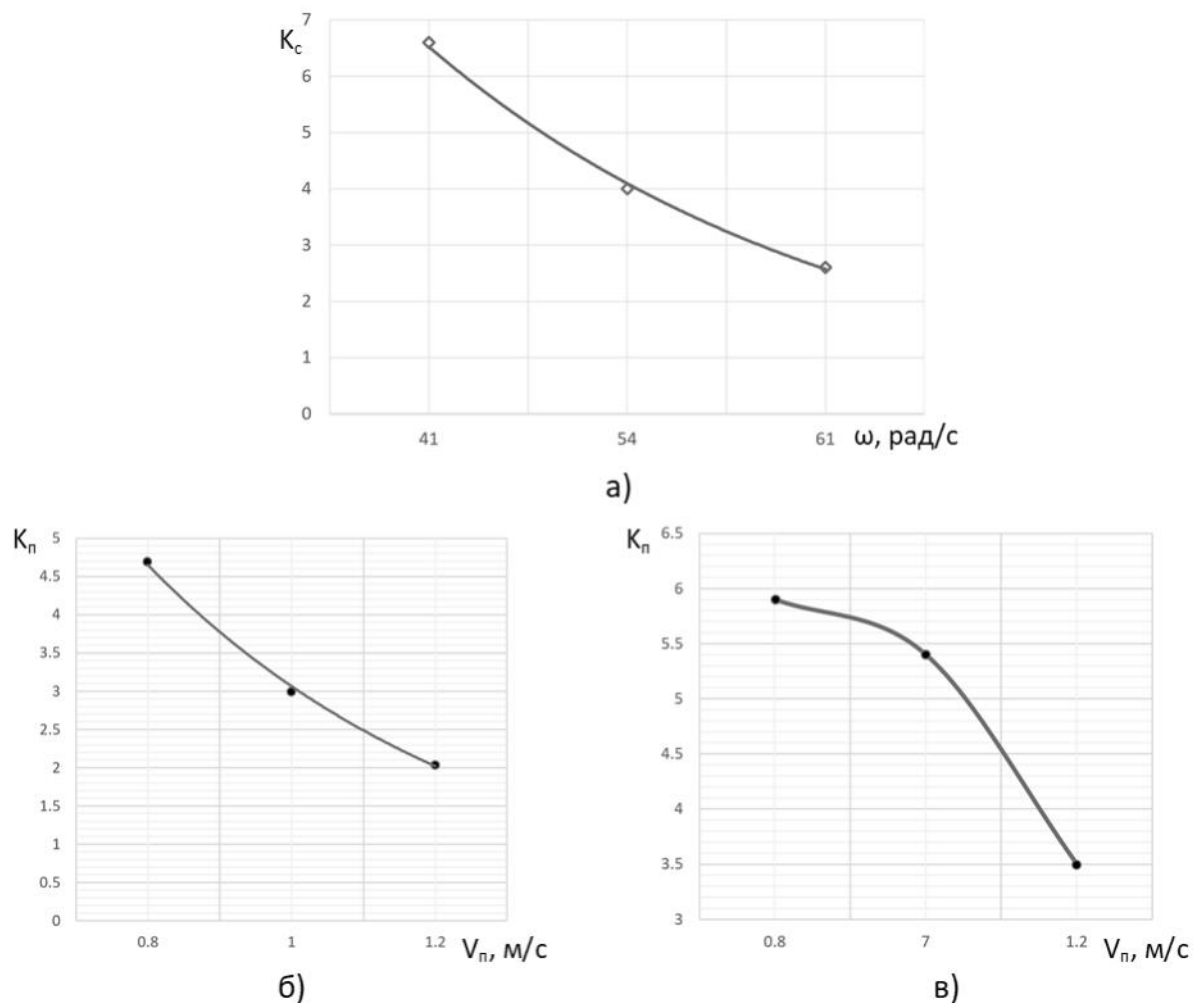


Рисунок 4 – Графічні залежності коефіцієнтів: ефективного опору від частоти коливань робочої поверхні (а), ефективного опору (б) та опору (в) від швидкості повітря
 Джерело: розроблено авторами

Аналіз отриманих залежностей дозволяє зазначити наступне. Найбільш суттєву дію на швидкість занурення частинки надають частота коливань опорної поверхні та витрата повітря, що надається від решето. Але збільшення швидкості повітря більше, ніж 1.2 м/с робить коливання шару зерна нестійким, що суттєво зменшує ефективність дії цього параметру в якості регулюючого.

Застосування імпульсної подачі повітряного потоку може дозволити збільшення величини подачі повітря при зменшенні часу дії на частинку. Тобто застосовуючи пульсувальний потік повітря, можна за рахунок зміни часу дії імпульсу сили (при однаковій швидкості потоку) змінювати величину аеродинамічної сили, яка впливає на зерновий шар, зменшуюючи його опір переміщенню товарної частки.

При використанні пульсуючого повітряного потоку повітря математично важко описати дискретно-періодичну зміну швидкості повітря, що подається через жалюзійне решето, тому в першому наближенні можна прийняти зміну швидкості повітря за гармонічним законом і описати рівнянням:

$$V_a = A_0 + A_2 \sin \omega_2 t, \quad (14)$$

де A_2 – амплітуда коливань швидкості повітря, A_0 – зміщення лінії симетрії коливань відносно початку координат.

Якщо $A_0 = A_2$ рівняння (14) прийме вигляд:

$$V_a(t) = A_2(1 + \sin \omega_2 t). \quad (15)$$

Параметри процесу руху частинки в коливальному середовищі описуються рівняннями (7) і (8) з урахуванням пульсації потоку (15) за допомогою обчислювальних методів набувають вигляду:

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + K_x \frac{dx(t)}{dt} = G_x + A_{1x} \sin \omega_1 t + A_{2x} (1 - \sin \omega_2 t)^2; \quad (16)$$

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + K_y \frac{dy(t)}{dt} = G_y + A_{1y} \sin \omega_1 t + A_{2y} (1 - \sin \omega_2 t)^2, \quad (17)$$

де $G_x = \frac{m - m_0}{m} g \sin \alpha$, $G_y = \frac{m - m_0}{m} g \cos \alpha$, $A_{1x} = \frac{m - m_0}{m} A_1 \omega_1^2 \cos \beta$,

$A_{1y} = \frac{m - m_0}{m} A_1 \omega_1^2 \sin \beta$, $A_{2x} = K_v A_2^2 \cos \gamma$, $A_{2y} = K_v A_2^2 \sin \gamma$, K_v – коефіцієнт вітрильності.

Початкові умови до системи рівнянь (16) і (17) запишемо у вигляді: $t = 0$, $x = y = 0$, $\dot{x}(0) = x_0$, $\dot{y}(0) = y_0$, $\dot{x}_0 = v_{0x}$, $\dot{y}_0 = v_{0y}$.

Підставляючи значення визначених експериментально коефіцієнтів опору за розв'язком рівнянь (16) та (17) отримано залежності переміщення частинки від часу і, відповідно, середню швидкість занурення (рисунок 5).

Процес переміщення шару матеріалу моделюється рівнянням переміщення матеріальної точки по нахиленій на кут α поверхні, яка здійснює коливальний рух у вертикальній площині за гармонійним законом $A \sin \omega t$ [14, 15].

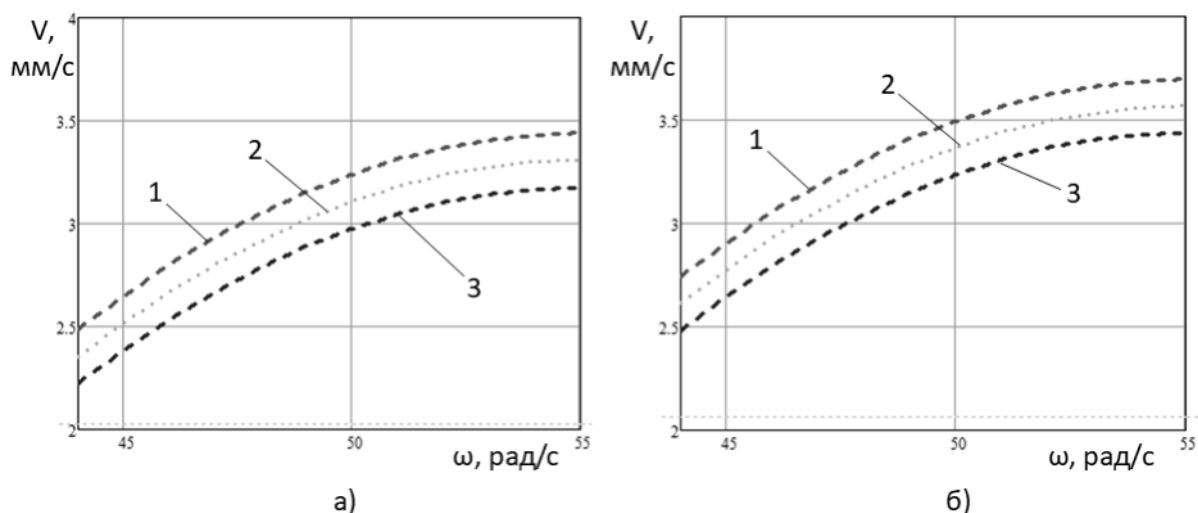


Рисунок 5 – Залежність швидкості занурення частинки від частоти коливань і швидкості повітря при постійному (а) та імпульсно-періодичному (б) потоці:

1 – $V_n = 1.2$ м/с, 2 – $V_n = 1.0$ м/с, 3 – $V_n = 0.8$ м/с

Джерело: розроблено авторами

За умови сумісної дії на частинку коливної площини та висхідного потоку повітря відомі рівняння відносного руху частинки можна записати у вигляді:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = mA\omega^2 \cos\beta \sin\omega t - mg \sin\alpha - fN; \quad (18)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = mA\omega^2 \sin\beta \sin\omega t - mg \cos\alpha + N + R_n, \quad (19)$$

де f – коефіцієнт тертя, R_n – сила тиску повітря, N – нормальна реакція.

Рівняння записані для руху частинки вздовж осі ОХ.

Для відносного руху без підкидання частинки ($d^2 y/dt^2 = 0$), що дозволяє з рівняння (19) визначити нормальну реакцію $N = mg \cos\alpha - mA\omega^2 \sin\beta \sin\omega t - R_n$, та підставляючи значення N в рівняння (19), після скорочень та перетворень матимемо:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = A\omega^2 (\cos\beta + f \sin\beta) \sin\omega t - g(\sin\alpha + f \cos\alpha) - fR_n. \quad (20)$$

Замінюючи $f = \tan\varphi$, рівняння (20) приводиться до вигляду:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = a_{\pm} (\sin\delta + Z_{\pm}), \quad (21)$$

$$\text{де } \delta = \omega t, \quad a_{\pm} = A\omega^2 \frac{\cos(\beta \pm \varphi)}{\cos\varphi}, \quad Z_{\pm} = \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha \pm \varphi)}{\cos(\beta \pm \varphi)}.$$

В означених рівностях верхні знаки (та індекси Z і a) відносяться до випадку руху частинки в напрямку ($x > 0$), а нижні – до випадку руху у зворотному напрямку ($x < 0$).

Інтегруючи рівняння (21) за методикою [14, 15] для безвідривного двостороннього режиму руху [14] частинки з двома миттєвими зупинками, в роботах [14, 15] визначено швидкість транспортування частинки вздовж деки:

$$\bar{V}_{cp} = A\omega \cos\beta \cos\varepsilon \sqrt{1 - \frac{\varepsilon z_{+}}{\sin\varepsilon}} \left(\left(\frac{2}{\pi} f \tan\varepsilon - \varepsilon + \frac{\pi}{2} \right) - 1 \right), \quad (22)$$

де $\varepsilon = \pi K / (K - 1)$, $K = z_{-} / z_{+}$.

Час перебування частинки (шару зерна) на решітній деці: $\tau = L / V_{cp}$ (де L – довжина деки). Ця величина має бути більшою за час, коли «важка» частинка з висоти шару h дійде до деки.

Аналіз отриманих результатів показує, що використання пульсуючого повітряного потоку зі змінною швидкістю дозволяє суттєво збільшити величину розщеплення траєкторій руху частинок і відповідно ефективність попереднього поділу зернового матеріалу, тобто перед подачею в повітряний канал; координати «важкої» та «легкої» частинок під час сходження з поверхні лотка матимуть різні значення, що унеможливило їхнє концентрування під час входження в повітряний потік. Порівнюючи із сучасними сепараторами, які використовують горизонтальні, похилі та вертикальні пневмоканали, ефективність поділу зернового матеріалу збільшується на 40...48 %.

Висновки. Результати проведених досліджень показали, що швидкість занурення частинок є основним наслідком розпушування шару та перерозподілу частинок різних розмірів та маси за висотою.

Отримані аналітичні та напівемпіричні залежності дозволяють встановити якісний зв'язок швидкості занурення від кінематичного та аеродинамічного режимів і кількісно оцінити вплив частоти коливання поверхні та параметрів імпульсного повітряного потоку на швидкість переміщення частинок.

Швидкість занурення частинок, тобто інтенсивність розшарування, збільшується при збільшенні частоти коливань і подачі повітря в шар зерна; при збільшенні частоти коливання збільшується швидкість пересування шару зерна вздовж поверхні, а збільшення подачі повітря зменшує швидкість пересування. Таким чином реалізація оптимального режиму поділу зернового матеріалу може бути здійснена одночасною зміною частоти коливань та подачею повітря. Тобто необхідно застосовувати двухконтурну систему автоматичного керування процесом поділу.

Список літератури

1. Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини. Т. 1. Обґрунтування параметрів транспортера-сепаратора : монографія / В. М. Сало та ін. Кіровоград : Лисенко В. Ф., 2014. 108 с.
2. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентильовання, охолодження) / Б. І. Котов та ін. Ніжин : Вид-во Лисенко М. М., 2017. 552 с.
3. Котов Б., Степаненко С. Основи теорії та технології повітряної сепарації зернових матеріалів. Київ : ЦП Компрінт, 2023. 427 с.
4. Математичне моделювання процесу переміщення зернового матеріалу на поверхні безпровального решета вібропневмоімпульсного сепаратора / С. П. Степаненко та ін. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3 (110). С. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-3-3>
5. Котов Б. І. Вібропневматичне розділення насіннєвих сумішей. *Вісник аграрної науки*. 2005. № 5. С. 55–58.
6. Петренко Н. Н., Марченко І. В., Марченко К. Н. О возможности использования пульсирующего воздушного потока для воздушно-решетной очистки зернового вороха. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2002. С. 117–121.
7. Петренко Н. Н., Марченко І. В., Марченко К. Н. Анализ процесса сепарации зерна на решете в среде пульсирующего воздушного потока. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2003. Вип. 33. С. 141–149.
8. Котов Б. І. Ідентифікація параметрів сипкого середовища у віброзрідженому стані за експериментальними даними. *Збірник наукових праць Національного аграрного університету*. Київ, 2003. С. 161–163.
9. Богатирьов Д. В. Обґрунтування параметрів пневмоімпульсної машини для сепарації насіння за густиною : дис. ... канд. техн. наук. Кіровоград, 2005. 170 с.
10. Петренко М. М., Богатирьов Д. В. Теоретичні дослідження пневмоімпульсної сепарації за густиною. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2002. Вип. 32. С. 140–146.
11. Степаненко С. П. Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Глеваха, 2008. 20 с.
12. Степаненко С. П., Котов Б. І., Попадюк І. С. Дослідження процесу пневмовібраційного поділу зерна за густиною під час одномірного переміщення зернового потоку. *Механізація та електрифікація сільськогосподарства*. 2021. № 14. С. 77–87. DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-8>
13. Бредихін В. В. Наукові основи процесів вібропневматичного розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння : дис. ... д-ра техн. наук. Кропивницький, 2023. 50 с.
14. Степаненко С. П., Волик Д. А. Математичне моделювання та результати експериментальних досліджень процесу вібропневмоімпульсного поділу насіння за густиною. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2023. Вип. 53. С. 138–148. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.138-148>
15. Волик Д., Попадюк І., Степаненко С. Аналіз конструкцій та перспективи розвитку технічних засобів для розділення насіння за густиною. *Механіка та автоматика агропромислового виробництва*. 2023. Т. 2, № 116. С. 100–110. DOI: <https://doi.org/10.37204/2786-7765-2023-2-11>
16. Котов Б. І., Степаненко С. П. Механіко-математична модель руху твердої частинки у віброзрідженому шарі зерна. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2004. № 15. С. 433–437.
17. Котов Б. І., Степаненко С. П. Дослідження впливу пульсуючого повітряного потоку на переміщення у віброзрідженому шарі зерносоломистого вороху. *Механізація та автоматизація сільськогосподарства*. 2016. Т. 4, № 103. С. 38–46.

References

1. Salo, V. M., et al. (2014). *Development of a new design of a pneumatic-sieve grain cleaning machine. Vol. 1. Substantiation of the parameters of the conveyor-separator: Monograph*. Kirovohrad: Lysenko V. F. [in Ukrainian].
2. Kotov, B. I., et al. (2017). *Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and storage of grain (cleaning, separation, drying, active ventilation, cooling)*. Nizhyn: Lysenko M. M. Publishing [in Ukrainian].
3. Kotov, B., & Stepanenko, S. (2023). *Fundamentals of the theory and technology of air separation of grain materials*. Kyiv: CP Komprint [in Ukrainian].

4. Stepanenko, S. P., et al. (2023). *Mathematical modeling of the process of grain material movement on the surface of a non-failing sieve of a vibropneumo-impulse separator*. *Vibrations in Engineering and Technology*, 3(110), 22–34. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-3-3> [in Ukrainian].
5. Kotov, B. I. (2005). *Vibropneumatic separation of seed mixtures*. *Bulletin of Agricultural Science*, (5), 55–58 [in Ukrainian].
6. Petrenko, N. N., Marchenko, I. V., & Marchenko, K. N. (2002). *On the possibility of using a pulsating air flow for air-sieve cleaning of grain heap*. *Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, 117–121 [in Ukrainian].
7. Petrenko, N. N., Marchenko, I. V., & Marchenko, K. N. (2003). *Analysis of the grain separation process on a sieve in a pulsating air flow environment*. *Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (33), 141–149 [in Ukrainian].
8. Kotov, B. I. (2003). *Identification of parameters of a bulk medium in a vibrofluidized state based on experimental data*. *Collection of Scientific Papers of the National Agrarian University*, 161–163 [in Ukrainian].
9. Bohatyriov, D. V. (2005). *Substantiation of parameters of a pneumo-impulse machine for seed separation by density* (Candidate's thesis). Kirovohrad [in Ukrainian].
10. Petrenko, M. M., & Bohatyriov, D. V. (2002). *Theoretical studies of pneumo-impulse separation by density*. *Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (32), 140–146 [in Ukrainian].
11. Stepanenko, S. P. (2008). *Improving the efficiency of vibropneumatic grain separators* (Extended abstract of candidate's thesis). Hlevakha [in Ukrainian].
12. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I., & Popadiuk, I. S. (2021). *Study of the process of pneumatic-vibrational grain separation by density during one-dimensional movement of the grain flow*. *Mechanization and Electrification of Agriculture*, (14), 77–87. <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-8> [in Ukrainian].
13. Bredykhin, V. V. (2023). *Scientific foundations of vibropneumatic processes of seed material separation by seed density* (Doctoral thesis). Kropyvnytskyi [in Ukrainian].
14. Stepanenko, S. P., & Volyk, D. A. (2023). *Mathematical modeling and experimental studies of the process of vibropneumo-impulse seed separation by density*. *Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (53), 138–148. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.138-148> [in Ukrainian].
15. Volyk, D., Popadiuk, I., & Stepanenko, S. (2023). *Analysis of designs and prospects for the development of technical means for seed separation by density*. *Mechanics and Automation of Agro-Industrial Production*, 2(116), 100–110. <https://doi.org/10.37204/2786-7765-2023-2-11> [in Ukrainian].
16. Kotov, B. I., & Stepanenko, S. P. (2004). *Mechanical-mathematical model of solid particle movement in a vibrofluidized grain layer*. *Engineering in Agricultural Production, Mechanical Engineering, Automation*, (15), 433–437 [in Ukrainian].
17. Kotov, B. I., & Stepanenko, S. P. (2016). *Study of the influence of a pulsating air flow on movement in a vibrofluidized layer of grain-straw heap*. *Mechanization and Automation of Agriculture*, 4(103), 38–46 [in Ukrainian].

Borys Kotov¹, Valentyn Myronenko², Serhii Pohorylyi³, Prof., DSc., Volodymyr Hryshchenko³, Yuriy Pantsyr¹, Assoc. Prof., PhD

¹Podilskyi State University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

²Institute of Mechanics and Automation of Agro-Industrial Production of the NAAS of Ukraine, Hlevakha, Ukraine

³National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Analysis of Vibro-Pneumatic Separation Processes of Grain Materials in the Context of Control Objectives

The aim of the study is to determine the influence of kinematic and aerodynamic parameters on the movement of particles in a vibro-pneumatically fluidized layer and along an oscillating supporting surface.

This work addresses the enhancement of separation efficiency of grain materials in vibro-pneumatic separators by employing pulsating airflow and implementing a dual-loop automated control system for regulating separation parameters. It has been established that particle motion and stratification within the grain layer exhibit a probabilistic and statistical nature, which complicates the maintenance of stable and efficient operating modes in conventional screen-air cleaning systems. A regulation approach is proposed, involving coordinated variation of oscillation frequency of the working surface and airflow parameters, which enables intensification of stratification in the grain mass and improves separation accuracy based on aerodynamic properties and specific weight.

The analysis of experimental results demonstrates that the application of pulsating airflow significantly increases the divergence of particle trajectories for lighter and heavier fractions, thereby reducing their recombination prior to entering the pneumatic channel. This approach results in a 40–48% improvement in the efficiency of preliminary grain material separation compared to conventional systems utilizing horizontal, inclined, or vertical pneumatic ducts. Theoretical investigations substantiate the effect of kinematic and aerodynamic regimes on the particle settling velocity, which is a critical parameter for effective stratification. It is shown that increasing the oscillation frequency enhances the transport velocity of the grain layer along the supporting surface, while increased airflow rate has an inverse effect. This mutual interaction underlines the necessity of employing a dual-loop control system to optimize the separation process.

The research findings can be utilized in the design of new or modernization of existing vibro-pneumatic separators, aiming to improve throughput, final product quality, and energy efficiency in grain cleaning operations.

mathematical modeling, vibrofluidic layer, algorithm, grain, semi-empirical dependences

Одержано (Received) 02.07.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025