

Севостьянов І. В.
д.т.н., професор

Мельник О. С.
аспірант

Підлипна М. П.
аспірантка

*Винницький
національний аграрний
університет*

Sevostianov I.
Doctor of Technical Sciences,
Professor

Melnyk O.
Postgraduate Student

Pidlypna M.
Postgraduate Student

*Vinnitsia National
Agrarian University*

УДК 621.928

DOI: 10.37128/2306-8744-2021-3-12

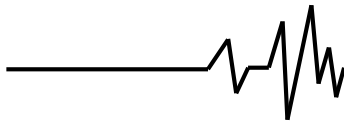
ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ КЛАСИФІКАЦІЇ СУХОЇ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ РІЗНИХ СХЕМ ЇЇ НАВАНТАЖЕННЯ

Процеси класифікації (сепарування, сортування, розділення, фракціонування) сухих дисперсних матеріалів є досить поширеними в харчовій, хімічній та переробній промисловості, в сільському господарстві, металургії, на машинобудівних підприємствах та у будівництві. Зокрема, на харчових підприємствах реалізуються дві групи даних процесів – для виділення з сировини фракцій з частинками різних розмірів, форми, густини, аеродинамічних або електромагнітних властивостей або очищення сировини від сторонніх домішок (піску, каміння, металевих частинок). На даний момент відома велика кількість методів та способів класифікації (механічних, гідравлічних, пневматичних, електрофізичних) та видів обладнання для їх реалізації (грохотів, розсівів, трієр, буратів, гідравлічних, пневматичних та електромагнітних сепараторів), у зв'язку із цим актуальною задачею є вибір для конкретного виду сировини та технології найбільш раціонального способу класифікації та обладнання для його здійснення. У статті наведені рівняння та залежності для визначення витрат часу та енергії при реалізації процесів механічної класифікації зернової сировини за допомогою різних схем навантаження при використанні найбільш поширеного обладнання. При цьому порівнюються процеси класифікації, що здійснюються під впливом, гравітаційних або відцентрових сил, вібраційних впливів, та навантаження, створюваного гідроімпульсним або електромагнітним приводом. В якості основних робочих параметрів процесів обрані максимальна швидкість руху частинки оброблюваного матеріалу та енергоємність класифікації. З використанням запропонованих залежностей може бути створена комп'ютерна програма для розробки раціональної технології класифікації з врахуванням фізико-механічних характеристик перероблюваної сировини та конкретних умов виробництва.

Ключові слова: класифікація, зернова сировина, вібрація, відцентрова сила, енергоємність, продуктивність.

Постановка проблеми. Процеси класифікації (сепарування, сортування, розділення) сухих дисперсних матеріалів є досить поширеними в харчовій, хімічній та переробній промисловості, в сільському господарстві, в металургії, на машинобудівних підприємствах та у будівництві. Зокрема, на

харчових підприємствах реалізуються дві групи даних процесів – для виділення з сировини фракцій з частинками різних розмірів, форми, густини, аеродинамічних або електромагнітних властивостей або очищення сировини від сторонніх домішок (піску, каміння, металевих частинок) [1, 2]. На даний момент відома



велика кількість методів та способів класифікації (механічних, гідравлічних, пневматичних, електрофізичних) та видів обладнання для їх реалізації (грохотів, розсівів, трієр, буратів, гідравлічних, пневматичних та електромагнітних сепараторів), у зв'язку із цим актуальною задачею є вибір для конкретного виду сировини та технології найбільш раціонального способу класифікації та обладнання для його здійснення) [1, 2].

Аналіз останніх досліджень. Дослідженням процесів класифікації дисперсних систем та їх удосконаленню в напрямку підвищення продуктивності та якості робочого процесу, а також зниження його енергоємності присвячена велика наукових робіт різних авторів.

В роботі [3] встановлено, що в середньому питома витрата електроенергії зернових сепараторів становить 0,33 кВт·г/т, а для калібрувальних машин 0,67 кВт·г/т. Найбільшу питому витрату електроенергії мають: серед зернових сепараторів повітряно-ситові - 0,44 кВт·г/т, серед калібрувальних машин шнекові - 0,96 кВт·г/т. Для зменшення витрати електроенергії виконані теоретичні й експериментальні дослідження, які дозволили розраховувати й розробити енергозберігаючі процеси, а також створити нові, більш ефективні машини для класифікації рослинної сировини. Переміщення сипкої сировини по поверхнях виконавчих елементів машин залежить від кутів зовнішнього тертя на різних ситових поверхнях: сталевих решетах із гніздами різної форми; дротяних сітках із гніздами різних розмірів. Застосування обмежуючої поверхні, встановленої над решетом калібрувальної машини, знижує швидкість падіння сировини на кожному етапі польоту, що не допускає заклинювання одиниць сировини в решеті. Визначені раціональні параметри встановлення обмежуючої поверхні над решетом, 0,5...0,6 від максимальної висоти польоту сировини; параметри коливань декі: амплітуда 0,02 м; частота 26 Гц; кут спрямованості коливань 45° [3]. Але представлені результати, так само як і оптимальні параметри калібрування сировини на східчастому горизонтальному ситі, в обертовому, горизонтально встановленому ситовому барабані, в дисковій калібрувальній машині отримані для плодової сипкої сировини: зеленого горошку, картоплі та ріпчастої цибулі. Тому, для зернової сировини пропонувані удосконалені способи та робочі режими мають бути перевірені та уточнені.

В роботі [4] наведені результати чисельного моделювання та експериментальних

досліджень процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією вібруючого решета. Отримані залежності зміни сумарної концентрації θ і продуктивності q від подачі насіння Q , кута нахилу решета α , частоти коливань решета ψ і амплітуди коливань решета A . Також в роботі [4] проведено чисельне моделювання та експериментальні дослідження процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією вібруючої поверхні за об'ємною масою та отримані залежності зміни коефіцієнта заповнення θ , коефіцієнта розподілу δ і продуктивності q від подачі насіння Q , кутів нахилу вібруючої поверхні α та β , частоти коливань ψ , амплітуди коливань A і швидкості повітряного потоку V .

В роботі [5] подано удосконалений комбінований спосіб інерційно-фільтрувального сепарування газорідних дисперсних систем, при реалізації якого фільтрувальні пристрої використовуються тільки в зонах потенційного вторинного унесення з інерційних сепараційних каналів. Таким чином, досягається зниження гідравлічного опору та підвищення ефективності сепарації у широких діапазонах навантажень та співвідношення фаз. Перевірки ефективності даного способу для реалізації процесів класифікації інших видів дисперсних систем не проводилось.

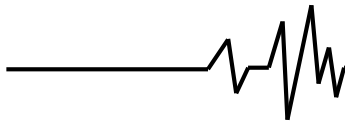
Дослідження, що представлені в роботі [6] також спрямовані на удосконалення процесів розділення газорідних дисперсних систем.

В роботі [7] розроблений та досліджений експериментальний зразок удосконаленого роторно-гравітаційного класифікатора сипкої сировини, в якому завдяки обертовим дискам забезпечується рівномірне розподілення оброблюваного матеріалу в робочій зоні під час продування його стисненим повітрям, підвищення на 10 – 15% в порівнянні із типовими зразками продуктивності та зниження енергоємності робочого процесу.

Постановка задачі. Метою роботи є отримання рівнянь та залежностей для проведення порівняльного розрахунку продуктивності та енергоємності процесів класифікації сухої зернової сировини при використанні основних механічних способів та визначення найбільш ефективного варіанту навантаження.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 представлені схеми можливих способів навантаження частинки зернової сировини масою m в процесі її класифікації.

На рис. 1, а представлена схема переміщення частинки по східчастій робочій поверхні вібросита [3], що здійснює



горизонтальні коливання. Частинка рухається зліва направо та профіль робочої поверхні запобігає її зворотному переміщенню. Частинка навантажена силами: рушійною F_p з боку виконавчого елемента вібросити; силою тертя F_m об робочу поверхню; N – силою реакції опори; силою власного тяжіння mg . Вважаємо режим руху безвіддривним.

Диференціальне рівняння руху частинки відносно осі x має вигляд

$$m\ddot{x} = \frac{F_p(t)}{\cos\alpha} - mg \cdot \sin\alpha - F_m = \frac{F_p(t)}{\cos\alpha} - mg \times$$

енергії під час переміщення частинки матиме вигляд

$$\frac{F_d l \cdot \cos\theta \cos\alpha}{2} = \frac{m \cdot v_{4,max}^2}{2} + mg \cdot l \cdot \sin\alpha + mg \cdot l \cdot \mu, \quad (3)$$

де l – переміщення частинки за один робочий цикл уздовж виступу робочої поверхні вібросити (див. рис. 1, а).

Отже енерговитрати на переміщення частинки при використанні першої схеми навантаження (рис. 1, а), з врахуванням рівняння (2)

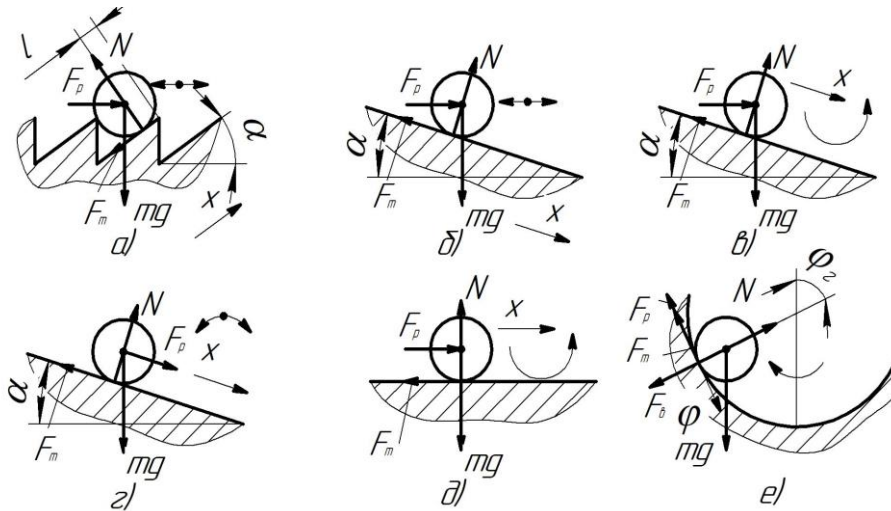


Рис. 1 Схеми можливих способів навантаження частинки зернової сировини в процесі її класифікації

$$\times \sin\alpha - N \cdot \mu = \frac{F_p(t)}{\cos\alpha} - mg \cdot \sin\alpha - mg \cdot \mu; \quad (1)$$

$$0 \leq t \leq \frac{60}{2n_d},$$

де μ – коефіцієнт тертя між частинкою та робочою поверхнею; n_d – частота обертання вала дебаланса вібросити, об/хв.

При цьому силу $F_p(t)$ знаходимо з рівняння

$$F_p(t) = F_d \cos\omega t = m_d \omega_d^2 r_d \cos\omega t; \quad 0 \leq t \leq \frac{60}{2n_d}, \quad (2)$$

де F_d – зусилля, створюване при обертанні дебаланса вібросити; m_d, r_d – маса та радіус дебаланса; $\omega_d = \frac{\pi \cdot n_d}{30}$ – кутова частота його обертання.

Вважаємо, що крок виступів робочої поверхні вібросити підбирається відповідно до n_d , так, щоб наприкінці кожного робочого ходу вібросити частинка проходила один виступ.

З рівнянь (1, 2) можна визначити максимальну швидкість частинки $v_{4,max}$ в момент часу $t = \frac{60}{2n_d}$.

З врахуванням того, що початкова швидкість частинки на початку кожного циклу дорівнює нулю ($v_{4,n} = 0$), рівняння балансів

$$E_1 = \frac{m_d \omega_d^2 r_d \cos\alpha}{2} = \frac{m \cdot v_{4,max}^2}{2} + mg \cdot l \cdot (\sin\alpha + \mu). \quad (4)$$

Питомі витрати енергії на переміщення частинки при використанні першої схеми на одиницю довжини (енергоємність класифікації)

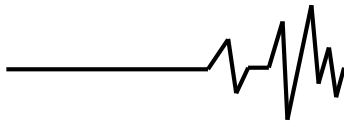
$$\epsilon_1 = \frac{E_1}{l}. \quad (5)$$

Друга схема навантаження (рис. 1, б) реалізується при класифікації дисперсних середовищ на похилих віброситих, що приводяться у зворотно-поступальні горизонтальні коливання за допомогою кривошипно-шатунного, дебалансного, гідроімпульсного або електромагнітного привода [1, 2, 3, 8] в горизонтальній площині.

Диференціальне рівняння руху частинки відносно осі x має вигляд

$$m\ddot{x} = F_p(t) \cos\alpha + mg \cdot \sin\alpha - F_m = F_p(t) \cos\alpha + mg \cdot \sin\alpha - N \cdot \mu = F_p(t) \times \cos\alpha + mg \cdot \sin\alpha - mg \cdot \mu; \quad 0 \leq t \leq \frac{60}{2n_d}, \quad (6)$$

При цьому силу $F_p(t)$ при використанні дебалансного або кривошипного привода знаходимо з рівняння (2), тоді як при використанні гідроімпульсного привода – за допомогою рівняння



$$F_p(t) = S_n \Delta p_r(t), 0 \leq t \leq \frac{t_{ц}}{2}, \quad (7)$$

де S_n – площа поршня гідроциліндра гідроімпульсного привода; $\Delta p_r(t)$ – зміна в часі тиску в порожнині гідроциліндра гідроімпульсного привода [9]; $t_{ц}$ – тривалість циклу спрацювання гідроімпульсного привода [9] (у випадку приєднання вібробуджувача гідроімпульсного привода за схемою «на вході» тривалість етапу збільшення тиску в порожнині гідроциліндра гідроімпульсного привода приблизно дорівнює половині періоду його спрацювання [8, 10]. В цьому випадку межі зміни часу в рівнянні (5) $0 \leq t \leq \frac{t_{ц}}{2}$.

При використанні електромагнітного привода величина F_p у продовж всього періоду робочого ходу вібросита є незмінною та рівною тяговому зусиллю F_e електромагнітного привода

$$F_p(t) = F_e; 0 \leq t \leq \frac{1}{2\omega_e}, \quad (8)$$

де ω_e – кутова частота коливань якоря електромагніта. Формула отримана з врахуванням припущення про те що пружина повернення якоря електромагніта є достатньо жорсткою тому тривалість робочого та холостого ходу виконавчого елемента електромагнітного вібробуджувача можна вважати приблизно однаковими. Тоді межі зміни часу в рівнянні (5) $0 \leq t \leq \frac{1}{2\omega_e}$.

З рівнянь (6, 2), (6, 7) або (6, 8) можна визначити максимальну швидкість частинки $v_{ч,max}$ в момент часу $t = \frac{60}{2n_d}$, ($t = \frac{t_{ц}}{2}$; $t = \frac{1}{2\omega_e}$).

З врахуванням того, що початкова швидкість частинки на початку кожного циклу дорівнює нулю ($v_{ч,п} = 0$), рівняння балансів енергії під час переміщення частинки у випадку реалізації другої схеми навантаження матимуть вигляд

- при використанні дебалансного привода:

$$\frac{F_d l \cdot \cos \theta \cos \alpha}{2} = \frac{m \cdot v_{ч,max}^2}{2} - mg \cdot l \cdot \sin \alpha + mg \cdot l \cdot \mu; \quad (9)$$

- при використанні гідроімпульсного привода [11]:

$$\frac{F_p(t) l \cdot \cos \alpha}{2} = \frac{m \cdot v_{ч,max}^2}{2} - mg \cdot l \cdot \sin \alpha + mg \cdot l \cdot \mu; \quad t = \frac{t_{ц}}{2}, \quad (10)$$

- при використанні електромагнітного привода:

$$F_p l \cdot \cos \alpha = \frac{m \cdot v_{ч,max}^2}{2} - mg \cdot l \cdot \sin \alpha + mg \cdot l \cdot \mu, \quad (11)$$

де l – довжина робочого ходу вібросита (амплітуда його коливань), що визначається з рівняння (6) як $l = x$ для моменту часу $t = \frac{60}{2n_d}$

(при використанні дебалансного

вібробуджувача), для моменту часу $t = \frac{t_{ц}}{2}$ (при використанні гідроімпульсного вібробуджувача), для моменту часу $t = \frac{1}{2\omega_e}$ (при використанні електромагнітного вібробуджувача).

Отже енерговитрати на переміщення частинки при використанні другої схеми навантаження (рис. 1, б), з врахуванням рівнянь (2, 6, 7)

- при використанні дебалансного привода:

$$E_2 = \frac{m_d \omega^2 r_d l \cdot \cos \alpha}{2} = \frac{m \cdot v_{ч,max}^2}{2} - mg \cdot l \cdot (\sin \alpha - \mu); \quad (12)$$

- при використанні гідроімпульсного привода:

$$E_2 = \frac{S_n \Delta p_r(t) l \cdot \cos \alpha}{2} = \frac{m \cdot v_{ч,max}^2}{2} - mg \cdot l \cdot (\sin \alpha - \mu); \quad t = \frac{t_{ц}}{2}; \quad (13)$$

- при використанні електромагнітного привода:

$$E_2 = F_e l = \frac{m \cdot v_{ч,max}^2}{2} - mg \cdot l \cdot (\sin \alpha - \mu). \quad (14)$$

Енергоємність класифікації при використанні другої схеми

$$\epsilon_2 = \frac{E_2}{l}. \quad (15)$$

В схемі на рис. 1, в частинка на поверхні сита рухається під впливом відцентрової сили F_p під час його безперервного обертання навколо вертикальної осі. Рух частинки здійснюється по колу відносно трьох осей координат [12]. Приймаємо припущення, що в горизонтальній площині швидкість руху частинки по осях x та y є приблизно однаковою та пов'язаною з коловою швидкістю частинки $v_{ч}$ співвідношеннями $v_{ч,x} = v_{ч} \cos \frac{\pi}{4}$; $v_{ч,y} = v_{ч} \sin \frac{\pi}{4}$. Диференціальне рівняння руху даної частинки записується як

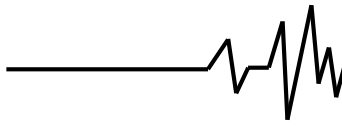
$$m \ddot{x} = F_p(t) \cos \alpha + mg \cdot \sin \alpha - F_m = F_p(t) \cos \alpha + mg \cdot \sin \alpha - N \cdot \mu = m_c \cdot \omega_c^2 \cdot x \cdot \cos \alpha + mg \cdot \sin \alpha - mg \cdot \mu; 0 \leq x \leq r_c, \quad (16)$$

де m_c – маса сита разом з порцією оброблюваного матеріалу на ньому; ω_c – кутова частота його обертання; r_c – радіус робочої поверхні сита.

З рівняння (16) можна визначити максимальну швидкість частинки $v_{ч,max}$ при $x = r_c$.

Рівняння балансів енергії під час переміщення частинки у випадку реалізації третьої схеми навантаження з врахуванням того, що початкова швидкість частинки на початку робочого процесу дорівнює нулю ($v_{ч,п} = 0$) матиме вигляд

$$\frac{l_c \omega_c^2}{2} = \frac{m \cdot v_{ч,max}^2}{2} - mg \cdot r_c \cdot \sin \alpha + mg \cdot r_c \cdot \mu, \quad (17)$$



де I_c – момент інерції сита з порцією зерна на ньому.

Отже енерговитрати на переміщення частинки при використанні третьої схеми навантаження (рис. 1, в)

$$E_3 = \frac{m \cdot v_{4,max}^2}{2} - mg \cdot r_c \cdot (\sin \alpha - \mu). \quad (18)$$

Енергоємність класифікації при використанні третьої схеми

$$\epsilon_3 = \frac{E_3}{r_c}. \quad (19)$$

В схемі на рис. 1, з частинка на поверхні вібролита, що встановлене на шарнірних важелях рухається під впливом відцентрової сили F_p під час його гойдальних зворотно-поворотних рухів, що забезпечує дебалансний, кулачковий, кривошипно-шатунний, гідроімпульсний або електромагнітний привод [1]. Диференціальне рівняння руху частинки записується як

Диференціальне рівняння руху частинки відносно осі x має вигляд

$$m\ddot{x} = F_p(t) + mg \cdot \sin \alpha - F_m = F_p(t) + mg \cdot \sin \alpha - N \cdot \mu = F_p(t) + mg \cdot \sin \alpha - mg \cdot \mu, \quad (20)$$

При цьому силу $F_p(t)$ при використанні дебалансного привода визначаємо за допомогою рівняння (2), для гідроімпульсного привода – з використанням рівняння (6), для електромагнітного привода – за формулою (7), з підстановкою в рівняння (20) відповідних часових меж.

Рівняння балансів енергії під час переміщення частинки у випадку реалізації четвертої схеми навантаження для випадків використання дебалансного, гідроімпульсного та електромагнітного привода матимуть вигляд

$$\text{- при використанні дебалансного привода:} \\ \frac{F_d l \cdot \cos 0}{2} = \frac{m \cdot v_{4,max}^2}{2} - mg \cdot l \cdot \sin \alpha + mg \cdot l \cdot \mu; \quad (21)$$

- при використанні гідроімпульсного привода:

$$\frac{F_p(t)l}{2} = \frac{m \cdot v_{4,max}^2}{2} - mg \cdot l \cdot \sin \alpha + mg \cdot l \cdot \mu; \\ t = \frac{t_{II}}{2}; \quad (22)$$

- при використанні електромагнітного привода:

$$F_p l = \frac{m \cdot v_{4,max}^2}{2} - mg \cdot l \cdot \sin \alpha + mg \cdot l \cdot \mu, \quad (23)$$

де l - довжина робочого ходу вібролита (амплітуда його коливань), що визначається з рівняння (20) як $l = x$ для моменту часу $t = \frac{60}{2n_d}$

(при використанні дебалансного вібробудувача), для моменту часу $t = \frac{t_{II}}{2}$ (при використанні гідроімпульсного вібробудувача), для моменту часу $t = \frac{1}{2\omega_e}$

(при використанні електромагнітного вібробудувача).

Отже енерговитрати на переміщення частинки при використанні четвертої схеми навантаження (рис. 1, з), з врахуванням рівнянь (2, 6, 7)

- при використанні дебалансного привода:

$$E_4 = \frac{m_d \omega_d^2 r_d l}{2} = \frac{m \cdot v_{4,max}^2}{2} - mg \cdot l \cdot (\sin \alpha - \mu); \quad (24)$$

- при використанні гідроімпульсного привода:

$$E_4 = \frac{S_n \Delta p_r(t) \cdot l}{2} = \frac{m \cdot v_{4,max}^2}{2} - mg \cdot l \cdot (\sin \alpha - \mu); \\ t = \frac{t_{II}}{2}; \quad (25)$$

- при використанні електромагнітного привода:

$$E_4 = F_e l = \frac{m \cdot v_{4,max}^2}{2} - mg \cdot l \cdot (\sin \alpha - \mu). \quad (26)$$

Енергоємність класифікації при використанні четвертої схеми

$$\epsilon_4 = \frac{E_4}{l}. \quad (27)$$

П'ята схема навантаження (рис. 1, д) реалізується при класифікації дисперсних середовищ на горизонтальних розсівах, що підвішені на шарнірно закріплених важелях та тросі і приводяться у коловий рух в горизонтальній площині за допомогою дебалансного привода [1].

Внаслідок колового руху несучої поверхні сита частинка на його поверхні рухається в горизонтальній площині по коловій траєкторії під впливом відцентрової сили F_p .

Диференціальне рівняння руху даної частинки записується як

$$m\ddot{x} = F_p - F_m = F_p - N \cdot \mu = m_d \omega_d^2 r_d - mg \cdot \mu; \\ 0 \leq x \leq r_c, \quad (28)$$

де m_d , r_d – маса та радіус дебаланса сита; $\omega_d = \frac{\pi \cdot n_d}{30}$ – кутова частота його обертання; r_c – радіус несучої поверхні сита.

З рівняння (28) можна визначити максимальну швидкість частинки $v_{4,max}$ при $x = r_c$.

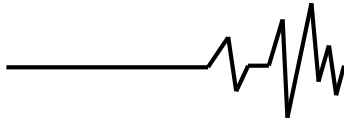
Рівняння балансів енергії під час переміщення частинки у випадку реалізації п'ятої схеми навантаження з врахуванням того, що початкова швидкість частинки на початку робочого процесу дорівнює нулю ($v_{4,0} = 0$) матиме вигляд

$$\frac{I_d \cdot \omega_d^2}{2} = \frac{m \cdot v_{4,max}^2}{2} + mg \cdot r_c \cdot \mu, \quad (29)$$

де I_d – момент інерції дебаланса сита.

Отже енерговитрати на переміщення частинки при використанні п'ятої схеми навантаження (рис. 1, д)

$$E_5 = \frac{m \cdot v_{4,max}^2}{2} + mg \cdot r_c \cdot \mu. \quad (30)$$



Енергоємність класифікації при використанні п'ятої схеми

$$\epsilon_5 = \frac{E_5}{r_c}. \quad (31)$$

Шостий варіант навантаження (рис. 1, е) забезпечується при класифікації дисперсних середовищ у барабанному ситі (бураті), що рівномірно обертається навколо власної горизонтальної осі з приводом від електродвигуна через редуктор [1]. Найбільш ефективним режимом роботи сита при використанні даної схеми навантаження буде режим, коли частинка під впливом рушійної сили F_p буде підніматись разом з несучою поверхнею, притискаючись до неї відцентровою силою F_e та складовою сили тяжіння mg , що діє в цьому ж напрямку, у положення, яке характеризується кутом повороту сита φ_e . Після досягнення цього положення, в якому інша складова сили тяжіння mg , що спрямована по дотичній в точці контакту частинки з несучою поверхнею стає більшою за суму сил F_p та F_m частинка починає прискорений рух в нижню точку траєкторії сита без відриву від несучої поверхні.

При цьому умова початку руху частинки з положення, що характеризується кутом φ_e

$$mg \cdot \sin \varphi_r > F_r + F_p = (mg \cdot \cos \varphi_r + F_B) \cdot \mu + F_p = (g \cdot \cos \varphi_r + \omega_c^2 r_c) \cdot m \cdot \mu + \frac{M_c}{r_c}, \quad (32)$$

де ω_c , r_c – кутова частота обертання та радіус сита; M_c – обертальний момент на валу сита.

Момент часу t_e початку руху частинки знаходимо як

$$t_r = \frac{\varphi_r}{\omega_c}. \quad (33)$$

Диференціальне рівняння руху частинки записується як

$$\begin{aligned} m\ddot{\varphi} &= mg \cdot \sin \varphi - F_r - F_p = mg \cdot \sin \varphi - \\ &- (mg \cdot \cos \varphi + F_B) \cdot \mu - F_p = \\ &= mg \cdot \sin \varphi - (g \cdot \cos \varphi + \omega_c^2 r_c) \cdot m \cdot \mu - \frac{M_c}{r_c}, \\ \varphi_r &\geq \varphi \geq 0. \end{aligned} \quad (34)$$

Рівняння балансів енергії під час переміщення частинки з нижнього положення у положення, яке характеризується кутом повороту сита φ_e у випадку реалізації шостої схеми навантаження матиме вигляд

$$\begin{aligned} \frac{I_c \cdot \omega_c^2}{2} &= \frac{m \cdot v_{\varphi}^2}{2} + mg \cdot (r_c - r_c \cos \varphi_r) = \\ &= \frac{m(\omega_c r_c)^2}{2} + mg \cdot r_c (1 - \cos \varphi_r), \end{aligned} \quad (35)$$

де I_c – момент інерції сита.

Отже енерговитрати на переміщення частинки при використанні шостої схеми навантаження (рис. 1, е)

$$E_6 = \frac{m(\omega_c r_c)^2}{2} + mg \cdot r_c (1 - \cos \varphi_r). \quad (36)$$

Енергоємність класифікації при використанні шостої схеми

$$\epsilon_6 = \frac{E_6}{\varphi_r r_c}. \quad (37)$$

Для коректного оцінювання розглянутих схем навантаження (див. рис. 1) слід порівнювати схеми на рис. 1, а, б, г, де реалізується періодичний зворотньо-поступальний або обертальний рух несучої поверхні сита у випадку використання дебалансного привода та схеми на рис. 1, в, д, е, в яких здійснюється безперервний обертальний рух виконавчого елемента.

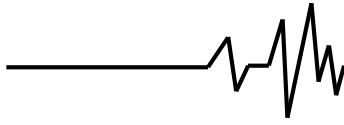
При цьому при порівнянні схем на рис. 1, а, б, г для оцінки продуктивності (визначення максимальної швидкості $v_{ч,max}$ руху частинки одного і того самого матеріалу і маси) потрібно використовувати рівняння (1, 6, 20) з підстановкою в них однакових значень рушійної сили F_p , а оцінку енергоємності проводити за допомогою формул (4, 5, 12, 15, 24, 28) з підстановкою в них однакових значень $v_{ч,max}$.

Аналогічно при порівнянні схем на рис. 1, в, д, е для оцінки продуктивності з використанням рівнянь (16, 28, 34) визначаємо максимальну швидкість $v_{ч,max}$ руху частинки одного і того самого матеріалу і маси з підстановкою в дані рівняння однакових значень рушійної сили F_p , а оцінку енергоємності проводимо за допомогою формул (18, 19, 30, 31, 36, 37) з підстановкою в них однакових значень $v_{ч,max}$.

Висновки. 1. Проведений авторами аналіз результатів досліджень процесів механічної класифікації (сепарування, розділення) дисперсних середовищ на фази за розмірами частинок показав недостатність експериментальних даних та засобів розрахунку параметрів ефективності (продуктивності та енергоємності) даних процесів під час класифікації сухої зернової сировини.

2. В статті отримані диференціальні рівняння руху частинки сухої зернової сировини під час здійснення її механічної класифікації з використанням різних схем навантаження при зворотньо-поступальному або обертальному русі виконавчого елемента сита, за допомогою яких може бути визначена максимальна швидкість переміщення частинки та оцінена продуктивність робочого процесу для кожної схеми. Наведені рівняння енергетичного балансу під час класифікації сухої зернової сировини для кожної з представлених схем навантаження та формули для розрахунку енергоємності.

3. З використанням запропонованих рівнянь та залежностей може бути складена



комп'ютерна програма для порівняння ефективності різних схем навантаження сухої зернової сировини під час здійснення її механічної класифікації за продуктивністю та енергоємності з метою вибору найбільш раціонального варіанту навантаження та виконання конкретних виробничих завдань з врахуванням параметрів наявного обладнання та сировини.

Список використаних джерел

1. Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник. Х.: Світ Книг, 2019. 496 с.
2. Бойко В.С., Самойчук К.О., Тарасенко В.Г., Верхоланцева В.О., Паляничка Н.О., Михайлов Є.В., Червоткіна О.О. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси: Підручник / Мелітополь, 2021. 445 с.
3. Фалько О.Л. Наукове обґрунтування процесу фракціонування рослинної сировини: автореф...дис... докт. техн. наук: 05.18.12 / Фалько Олександр Леонідович. Київ, 2014. 48 с.
4. Алієв Е. Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику : монографія. Запоріжжя: СТАТУС, 2019. 196 с.
5. Ляпощенко О.О. Теоретичні основи процесів інерційно-фільтруючої сепарації: автореф...дис... докт. техн. наук: 05.17.08 / Ляпощенко Олександр Олександрович. Львів, 2016. 39 с.
6. Павленко І.В. Науково-теоретичні основи вібраційних процесів у гетерогенних системах: автореф...дис... докт. техн. наук: 05.17.08 / Павленко Іван Володимирович. Суми, 2020. 46 с.
7. Ярмолик С.В., Чиркун Д.И., Левданский А.Э., Левданский Э.И. Экспериментальные исследования процесса разделения сыпучних материалов в роторно-гравитационном классификаторе. *Труды БГТУ*, 2009. №3. С.172-174.
8. Іскович-Лотоцький Р. Д., Обертюх Р. Р., Севостьянов І. В. Процеси та машини вібраційних і віброударних технологій. Монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006. 291 с.
9. Севостьянов І. В. Технологія та обладнання для віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів : монографія. Вінниця : ВНАУ, 2020. 303 с. ISBN 978-617-7789-16-0.
10. Севостьянов І. В., Луцик В. Л. Установка для багатостадійного зневоднення відходів харчових виробництв. *Вісник машинобудування та транспорту*, 2017. №1.

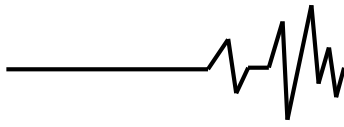
С. 105-113.

11. Севостьянов І. В. Поліщук О. В., Слабкий А. В. Розробка та дослідження установки для двокомпонентного віброударного зневоднення відходів харчових виробництв. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, 2015. №5/7(77). С. 40-46.

12. Sevostianov I., Ivanchuck Ya. Kravets S. Elaboration and researches of highly effective installation for vibro-blowing dehydration of dispersive waste of food productions. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2020. №3 (110). С. 24-33.

References

1. Cherevko, O. I., Poperechny, A. M. (2019) *Procesy i aparaty harchovyh vyrobnyctv [Processes and apparatuses of food productions]* Harkiv.: Svit Knyg [in Ukrainian].
2. Boiko, V.S., Samoichuk, K.O., Tarasenko, V.H., Verkholtantseva, V.O., Palianychka, N.O., Mykhailov, Ye.V., Chervotkina, O.O. (2021) *Protsesy i aparaty. Mekhanichni ta hidromekhanichni protsesy [Processes and apparatuses. Mechanical and hydromechanical processes]* Melitopol [in Ukrainian].
3. Falko, O.L. (2014) *Naukove obgruntuvannia protsesu fraktsionuvannia roslynnoi syrovyny: [Scientific substantiation of fractioning process of vegetable raw materials. Abstract of D-thesis. Speciality 05.18.12]*. Kyiv. [in Ukrainian].
4. Aliiev, E. B. (2019) *Fyzyko-matematychni modeli protsesiv pretsyziinoi separatsii nasinnievoho materialu soniashnyku : monohrafiia [Physical-mathematical models of precise separation processes of sunflower seed grain. Monograph]* Zaporizhzhia: STATUS [in Ukrainian].
5. Liaposhchenko, O.O. (2016) *Teoretychni osnovy protsesiv inertiino-filtruiuchoi separatsii: [Theoretical foundation of processes of inertia-filtration separation. Abstract of D-thesis. Speciality: 05.17.08]*. Lviv [in Ukrainian].
6. Pavlenko, I.V. (2020) *Naukovo-teoretychni osnovy vibratsiinykh protsesiv u heterohennykh systemakh. [Scientific-theoretical foundation of vibration processes in heterogeneous systems. Abstract of D-thesis. Speciality: 05.17.08]*. Sumy [in Ukrainian].
7. Jarmolik, S.V., Chirkun, D.I., Levdanskij, A.Je., Levdanskij, Je.I. (2009) *Jeksperimental'nye issledovanija processa razdelenija sypuchnih materialov v rotorno-gravitacionnom klassifikatore. Trudy BGTU [Experimental researches of a separation process of loose materials. Works of BGTU]*, 3, 172-174 [in Russian].



8. Iskovych-Lototskyi, R. D., Obertiukh, R. R., Sevostianov, I. V. (2006) *Protsesy ta mashyny vibratsiinykh i vibroudarnykh tekhnolohii [Processes and machines for vibration and vibro-blowing technologies]*. Monograph. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia [in Ukrainian].

9. Sevostianov, I. V. (2020) *Tekhnolohiia ta obladnannia dlia vibroudarnoho znevodnennia volohykh dyspersnykh materialiv : monohrafiia [Technology and equipment for vibro-blowing dehydration of damp dispersive materials : monograph]* Vinnytsia: VNAU [in Ukrainian].

10. Sevostianov, I. V., Lutsyk, V. L. (2017) *Ustanovka dlia bahatostadiinoho znevodnennia vidkhodiv kharchovykh vyrobnytstv [Installation for multistage dehydration of food productions waste]* *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 1, 105-113 [in Ukrainian].

11. Sevostianov, I. V. Polishchuk, O. V., Slabkyi, A. V. (2015) *Rozrobka ta doslidzhennia ustanovky dlia dvokomponentnoho vibroudarnoho znevodnennia vidkhodiv kharchovykh vyrobnytstv [Elaboration and research of installation for two-component vibro-blowing dehydration of food productions waste]*, 5/7 (77), 40 - 46 *Vostochno-evropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy* [in Ukrainian].

12. Sevostianov, I., Ivanchuck, Ya. Kravets, S. (2020) *Elaboration and researches of highly effective installation for vibro-blowing dehydration of dispersive waste of food productions. Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 3 (110), 24-33.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ КЛАССИФИКАЦИИ СУХОГО ЗЕРНОВОГО СЫРЬЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ЕГО НАГРУЗКИ

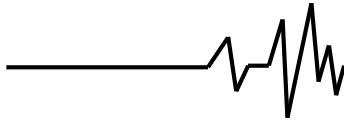
Процессы классификации (сепарирования, сортировки, разделения, фракционирования) сухих дисперсных материалов являются довольно распространенными в пищевой, химической и перерабатывающей промышленности, в сельском хозяйстве, металлургии, на машиностроительных предприятиях и в строительстве. В частности, на пищевых предприятиях реализуются две группы данных процессов – для выделения из сырья фракций с частицами различных размеров, формы, плотности, аэродинамических или электромагнитных свойств или очистки сырья от посторонних примесей (песка, камней, металлических частиц). На данный момент известно большое количество методов и способов классификации (механических, гидравлических,

пневматических, электрофизических) и видов оборудования для их реализации (грохотов, рассевов, триер, буратов, гидравлических, пневматических и электромагнитных сепараторов), в связи с этим актуальной задачей является выбор для конкретного вида сырья и технологии наиболее рационального способа классификации и оборудования для его осуществления. В статье приведены уравнения и зависимости для определения затрат времени и энергии при реализации процессов механической классификации зернового сырья с помощью различных схем нагрузки при использовании наиболее распространенного оборудования. При этом сравниваются процессы классификации, осуществляемые под воздействием гравитационных или центробежных сил, вибрационных воздействий, и нагрузки, создаваемой гидроимпульсным или электромагнитным приводом. В качестве основных рабочих параметров процессов выбраны максимальная скорость движения частицы обрабатываемого материала и энергоемкость классификации. С использованием предложенных зависимостей может быть создана компьютерная программа для разработки рациональной технологии классификации с учетом физико-механических характеристик перерабатываемого сырья и конкретных условий производства.

Ключевые слова: классификация, зерновое сырье, вибрация, центробежная сила, энергоемкость, производительность.

RESEARCH OF EFFICIENCY PARAMETERS OF PROCESSES OF CLASSIFICATION OF DRY CEREAL RAW MATERIALS WHEN USING DIFFERENT SCHEMES OF ITS LOADING

The classification processes (separation, sorting, separation, fractionation) of dry dispersed materials are quite common in the food, chemical and processing industries, in agriculture, metallurgy, at machine-building enterprises and in construction. In particular, at food enterprises, two groups of these processes are implemented - for the extraction of fractions with particles of various sizes, shapes, densities, aerodynamic or electromagnetic properties from raw materials, or for cleaning the raw materials from impurities (sand, stones, metal particles). At the moment, a large number of methods and methods of classification (mechanical, hydraulic, pneumatic, electrophysical) and types of equipment for their implementation (screens, screeners, triers, drum



screens, hydraulic, pneumatic and electromagnetic separators) are known, in this regard, an urgent task is to choose for a specific type of raw material and technology, of the most rational method of classification and equipment for its implementation. The article presents equations and dependencies for determining the time and energy consumption in the implementation of the processes of mechanical classification of grain raw materials using various load schemes using the most common equipment. At the same time, the classification processes carried out under the influence of gravitational or centrifugal forces, vibration effects, and the load created by a hydraulic impulse or electromagnetic drive are

compared. As the main operating parameters of the processes, the maximum speed of movement of a particle of the processed material and the energy intensity of the classification were selected. A computer program can be created with using of the proposed dependencies, to develop a rational classification technology, taking into account the physical and mechanical characteristics of the processed raw materials and specific production conditions.

Key words: classification, grain raw materials, vibration, centrifugal force, energy intensity, productivity.

Відомості про авторів

Севостьянов Іван Вячеславович – доктор технічних наук, завідувач кафедри «Технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: ivansev70@gmail.com).

Мельник Олександр Сергійович – аспірант Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: millermanel@gmail.com).

Підлипна Марина Петрівна - аспірантка Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: linak099@gmail.com)

Севостьянов Іван Вячеславович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологических процессов и оборудования перерабатывающих и пищевых производств» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: ivansev70@gmail.com).

Мельник Александр Сергеевич – аспирант Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Винницкая область, 21008, Украина, e-mail: millermanel@gmail.com).

Подлипная Марина Петровна – аспирантка Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Винницкая область, 21008, Украина, e-mail: linak099@gmail.com)).

Sevostianov Ivan – Doctor of Technical Sciences, Full Professor of the Department of “Technological Processes and Equipment of Processing and Food Productions” of Vinnytsia National Agrarian University (3 Solnechnaya St, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: ivansev70@gmail.com).

Melnik Oleksandr – Post-Graduate Student of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnychna str., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: millermanel@gmail.com).

Pidlypna Maryna – Post-Graduate Student of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnychna str., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: linak099@gmail.com).