

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-269-5-11-16>

УДК 621.9.048.6

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ «ВІБРОСЕПАРАТОР – СИПКА СИРОВИНА»

Ребот Д.П., Топільницький В.Г.

## MATHEMATICAL MODEL OF SYSTEM «VIBRATORY SEPARATOR - LOOSE MATERIAL»

Rebot D.P., Topilnytsky V.G.

*Побудовано розрахункову схему та математичну модель руху довільної точки системи "вібросепаратор - сипка сировина" в процесі сепарації, за умови вертикального коливання сита вібраційного сепаратора. Створена математична модель дає можливість моделювати різного типу нестационарні режими, які виникають під час роботи вібраційного сепаратора та провести дослідження впливу змінних параметрів його роботи і характеристик сипкої сировини на ефективність та інтенсивність процесу сепарації, для можливості їх подальшого коригування.*

**Ключові слова:** вібраційний сепаратор, сипка сировина, математична модель, амплітуда, частота.

**Вступ.** Швидкий розвиток промисловості зумовлює потребу впровадження нового обладнання з метою оптимізації та автоматизації процесів виробництва. Також це стосується і машин вібраційної дії, а саме, вібраційних сепараторів, сит та грохотів, які застосовуються у всіх галузях промисловості. Таке обладнання необхідне для поділу сипкої сировини за фракціями, видалення сторонніх домішок, збагачення, відсортування браку та інших операцій. На сьогодні існує велика кількість нових покращених сепараторів різних провідних виробників. Це зокрема Jubao Intelligent Manufacturing Co., Lighthouse Technologies, Kason Corporation, SWECO та ін. Вібраційні сита та сепаратори даних та інших фірм мають вдосконалену конструкцію, яка дозволяє проводити якісне відсортування продукції, зменшує час простою на виробництві, експлуатаційні втрати та викиди пилу. Вони прості в експлуатації, малогабаритні, малозумні та мають високу ємність. На відміну від попередніх конструкцій, які створювалися з корпусами квадратної або прямокутної форми із зворотньо-поступальним рухом сита зараз впроваджуються сепаратори та сита із циліндричною фор-

мою робочого корпусу, що дозволяє збільшити ємність на одиницю площі сита.

Проте, незважаючи на вагомий вдосконалення і надалі вібраційне обладнання для сепарації та виробничі процеси при сепарації продовжують досліджуватись з метою покращення конструкційних та експлуатаційних властивостей, продуктивності праці та ефективності процесу переробки сировини. На вищеперелічені показники впливає не лише конструкція вібраційного сепаратора, але й взаємодія його робочої поверхні із оброблювальною сипкою сировиною та процеси, які проходять в оброблюваній сировині під час сепарації.

**Постановка проблеми.** Процес вібраційної сепарації залежить від багатьох показників, зокрема, виробничих характеристик та конструкційних параметрів вібраційного сепаратора, фізико-механічних характеристик сипкої сировини. Густина, маса, пружні властивості частинок шару завантаження, амплітуда та частота їх коливання, швидкість руху по ситу, їх взаємодія між собою, зі стінками та ситом сепаратора значною мірою впливають на ефективність процесу сепарації та його якість, швидкість проходження частинок сировини крізь отвори сита. Також, значний вплив має кут нахилу сита, частота зовнішнього збурення (коливання сита вібросепаратора) на ефективність розрихлення сировини та її сепарації. З іншого боку, на амплітуду та частоту коливань сита вібраційного сепаратора впливає маса сита та шару сировини, жорсткість пружинної підвіски, частота обертання вібророзбуджувача та ін. Тобто існує певний взаємозв'язок між вище переліченими показниками та залежність продуктивності процесів сепарації від їх значень. Саме тому, дослідження взаємовпливу характеристик сепаратора та сипкої сировини є важливою задачею. Створення розрахункової та

математичної моделі системи “вібросепаратор – сипка сировина” дадуть змогу підібрати параметри вібраційного сепаратора в залежності від характеристик сипкої сировини, яка підлягає сепарації. Це, в свою чергу, забезпечить максимально можливу інтенсивність процесу сепарації. Також дослідження різного типу динамічних процесів у вібросепараторах дасть змогу оптимізувати їх конструкцію та сам процес сепарації, підвищити їх використання на виробництві, а також, в певній мірі, економічну вигоду в галузі експлуатації цих машин.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Незважаючи на впровадження нових більш вдосконалених та високоефективних моделей вібраційних сепараторів, для підвищення продуктивності та ефективності сепарації проводяться дослідження впливу параметрів вібросепаратора та характеристик сипких матеріалів на процес їх розділення. Зокрема, аналізується вплив кута нахилу сита та пружних, шорстких і геометричних властивостей частинок на швидкість їх сепарації [1,2]. Також актуальними є дослідження взаємодії шару сипкої сировини із поверхнею контейнера та сита сепаратора. Зокрема, вплив сил тертя та сил інерції на проходження частинок крізь отвори сита, вплив амплітудо-частотних характеристик сита на шар сировини [3-5]. Також значна увага приділяється дослідженням руху сипкої сировини у вібросепараторах циліндричної форми [6]. Така форма все частіше використовується через можливість передачі на сито вібрації більшої сили, та значно ефективнішого використання всієї поверхні просіювання. З іншого боку така конструкція, як і попередні забезпечує складний просторовий рух робочого контейнера сепаратора. З врахуванням останнього, через складність моделювання процесу сепарації та дослідження впливу на його ефективність параметрів шару сипкої сировини та контейнера сепаратора, розглядається, як правило, лише один випадок руху сепаратора [6-7]. Разом з тим, визначено, що для налипаючих частинок та важкопрохідних фракцій встановлення подвійних вібробуджувачів на корпусі сепаратора значно підвищує процес розрихлення суміші та її сепарації. Це пов'язано з тим, що за наявності лише одного вібробуджувача, розташування його на периферії сепаратора не дозволяє застосувати вплив вібрації на центр ваги сепаратора. Натомість, подвійні ексцентричні вібробуджувачі генерують вібрацію по всьому об'єму корпусу сепаратора. Відповідно, саме така модель є перспективною і може бути використаною для побудови розрахункової схеми.

Враховуючи вищевказане, а також як показують попередні дослідження [8-9], ефективність процесу сепарації залежить не лише від параметрів вібросепаратора, але від характеристик сипкої сировини та їх взаємодії між собою. Тому важливою задачею є побудова математичної моделі, яка дасть

змогу описати цю взаємодію та в подальшому дослідити її з метою оптимізації процесу сепарації.

**Метою роботи** є побудова розрахункової схеми та математичної моделі руху будь-якої точки системи “вібросепаратор – сипка сировина”, які дадуть змогу описати залежність процесу сепарації від параметрів сепаратора та характеристик сипкої сировини.

#### Виклад основного матеріалу дослідження.

Для створення розрахункової та на її основі математичної моделі системи “вібросепаратор – сипка сировина” потрібно розглянути різновид сепараторів, який широко використовується у промисловості та має ряд позитивних відмінностей від інших вібраційних сепараторів. Тобто, для побудови розрахункової моделі вибрано вібраційний сепаратор із двома незалежно-привідними ексцентричними вібробуджувачами. Такий вібраційний сепаратор позитивно відрізняється можливістю реалізації коливальних різної форми, відносною простотою конструкції та надійністю вузлів в процесі експлуатації, універсальністю для моделювання та впровадження отриманих результатів досліджень для експериментальних даних.

При побудові розрахункової моделі вібраційного сепаратора, вважатимемо, що його робочий контейнер здійснює тільки вертикальні коливання (Рис.)

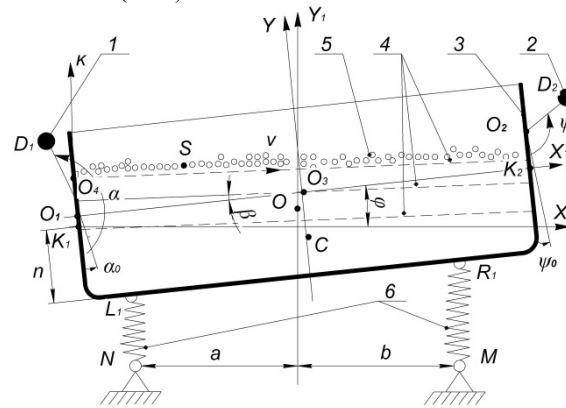


Рис. Розрахункова схема системи “вібросепаратор – сипка сировина”:

1,2 – ексцентрикові вібробуджувачі; 3 – контейнер вібросепаратора; 4 – сито; 5 – шар звантаженої сипкої сировини; 6 – пружини; S – деяка точка елементарного перерізу шару сипкої сировини на ситі вібросепаратора;  $XOY$ ,  $X_1O_3Y_1$  – відповідно нерухома та рухома системи координат;  $O_1$  і  $O_2$  – центри обертального руху вібробуджувачів;  $\varphi$  – кут нахилу корпусу та сита вібросепаратора від початкового положення, тоді  $O_1D_1 = r_1$ ,  $O_2D_2 = r_2$  – радіуси обертання лівого і правого вібробуджувачів;  $\alpha_0$  і  $\psi_0$  – початкові фази вібробуджувачів в нерухомому положенні, а  $\alpha = \omega_1 t$  та  $\psi = \omega_2 t$  – кути повороту вібробуджувачів,  $NL_1$  і  $MR_1$  – довжини пружин (6) під час руху сита сепаратора,  $NL$  і  $MR$  – довжини даних пружин у початковому положенні,  $a, b$  – відстані від опор до осі  $OY$ .

Для дослідження руху вібросепаратора (довільної точки його робочого контейнера) побудуємо систему диференціальних рівнянь, які будуть враховувати всі параметри установки і описувати рух робочого контейнера вібросепаратора. При підстановці в неї необхідних заданих параметрів сепаратора, отримаємо рівняння для визначення амплітуди і частоти будь-якої точки робочого контейнера. Основою математичної моделі його руху буде закон руху центру мас. З врахуванням вищевказаного, положення центру мас системи опишеться рівняннями:

$$\begin{aligned} x_{u.m.}(t) &= \frac{M_u x_u(t) + M_{D1} x_{D1}(t) + M_{D2} x_{D2}(t)}{M_u + M_{D1} + M_{D2}}, \\ y_{u.m.}(t) &= \frac{M_u y_u(t) + M_{D1} y_{D1}(t) + M_{D2} y_{D2}(t)}{M_u + M_{D1} + M_{D2}}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $x_u(t)$  і  $y_u(t)$  - координати центра мас робочого контейнера вібросепаратора,  $x_{Di}(t)$ ,  $y_{Di}(t)$  - координати центрів мас відповідно першого і другого віброзбудників.

З (1) можна побачити, що координати які описують центр мас механічної системи є складними функціями кінематичних та геометричних показників контейнера, а також положення віброзбудників. З врахуванням останнього за базову точку необхідно вибрати геометричний центр вібросепаратора.

Координати центру мас віброзбудників та контейнера вібросепаратора відносно  $Y_1O_3X_1$  будуть мати вигляд:

- 1) для контейнера:  $x_1 = 0$ ,  $y_1 = -P$ ;
- 2) для першого ексцентрикового віброзбудника –  $x_1^{D1} = r_1 \sin(\omega_1 t + \alpha_0) - l_1$ ,  $y_1^{D1} = k_1 - r_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_0)$ ;
- 3) для другого ексцентрикового віброзбудника -  $x_2^{D2} = r_2 \sin(\omega_2 t + \psi_0) + l_2$ ,  $y_2^{D2} = k_2 - r_2 \cos(\omega_2 t + \psi_0)$

де  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  - кутові швидкості обертання віброзбудників.

Центр мас віброзбудників та контейнера відносно  $YOX$  матиме наступні координати:

- 1) для контейнера -

$$\begin{aligned} x_c &= x_{o3} + P \sin \varphi, \\ y_c &= y_{o3} - P \cos \varphi; \end{aligned} \quad (2)$$

- 2) для першого ексцентрикового віброзбудника –

$$\begin{aligned} x_{D1} &= x_{o3} + x_1^{D1} \cos \varphi - y_1^{D1} \sin \varphi = \\ &= x_{o3} + r_1 \sin(\omega_1 t + \varphi + \alpha_0) - l_1 \cos \varphi - u_1 \sin \varphi, \\ y_{D1} &= y_{o3} + x_1^{D1} \sin \varphi + y_1^{D1} \cos \varphi = \\ &= y_{o3} - r_1 \cos(\omega_1 t + \varphi + \alpha_0) - l_1 \sin \varphi + u_1 \cos \varphi; \end{aligned} \quad (3)$$

- 3) для другого ексцентрикового віброзбудника –

$$\begin{aligned} x_{D2} &= x_{o3} + x_2^{D2} \cos \varphi - y_2^{D2} \sin \varphi = \\ &= x_{o3} + r_2 \sin(\omega_2 t + \varphi + \psi_0) + l_2 \cos \varphi - u_2 \sin \varphi, \\ y_{D2} &= y_{o3} + x_2^{D2} \sin \varphi + y_2^{D2} \cos \varphi = \\ &= y_{o3} - r_2 \cos(\omega_2 t + \varphi + \psi_0) + l_2 \sin \varphi + u_2 \cos \varphi. \end{aligned} \quad (4)$$

Виходячи з отриманих залежностей необхідно зазначити, що зміни координат віброзбудників і центру мас вібросепаратора в часі складаються із геометричних даних системи і координат які вказують центр контейнера ( $O_3$ ), а значить є функціями які описують останніх. Отже, за координати руху системи “вібросепаратор – сипка сировина” варто прийняти лінійні переміщення геометричного центру сепаратора  $x_{o3}$ ,  $y_{o3}$ , а також кут повороту  $\varphi$  контейнера вібросепаратора відносно власного центра мас.

Використавши рівняння Лагранжа II роду отримаємо диференціальне рівняння системи:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial L}{\partial q_j} = 0, \quad (5)$$

де  $L = T - (P + P_p)$  - функція-Лангранжиан,  $T = T_k + T_{D1} + T_{D2}$  - кінетична енергія системи, що складається з суми кінетичних енергій контейнера сепаратора та енергії двох віброзбудників,  $P$  - потенціальна енергія системи (контейнера сепаратора та віброзбудників),  $P_p$  - потенціальна енергія пружинної підвіски контейнера сепаратора,  $q_j$  - узагальнені координати, тобто  $q_1 = x_{o3}$ ,  $q_2 = y_{o3}$ ,  $q_3 = \varphi$ , а  $\dot{q}_1 = \dot{x}_{o3}$ ,  $\dot{q}_2 = \dot{y}_{o3}$ ,  $\dot{q}_3 = \dot{\varphi}$ , відповідно, їх узагальнені швидкості [9].

Кінетична енергія контейнера сепаратора:

$$T_k = \frac{M_k}{2} (\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) + \frac{1}{2} I \dot{\varphi}^2, \quad (6)$$

де  $M_k$  - маса контейнера,  $I$  - момент інерції контейнера відносно точки  $O_3$ .

Кінетична енергія ексцентрикових віброзбудників:

$$T_D = \frac{M_{D1}}{2} (\dot{x}_{D1}^2 + \dot{y}_{D1}^2) + \frac{M_{D2}}{2} (\dot{x}_{D2}^2 + \dot{y}_{D2}^2). \quad (7)$$

Віброзбудники вважаються матеріальними точками, в яких є зосереджена маса кожного з них, і виходячи з цього для запису кінетичної енергії віброзбудників використовуються вирази для знаходження кінетичної енергії матеріальної точки.

Потенціальну енергію контейнера і віброзбудників можна записати у вигляді:

$$P_D = M_{D_1}gh_1 + M_{D_2}gh_2 + M_Kgh_3, \quad (8)$$

де  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  - функції, які визначають вертикальні переміщення центрів мас контейнера та віброзбудників впродовж деякого проміжку часу роботи сепаратора, тобто

$$\begin{aligned} h_1 &= y_{o3} + r_1 \cos \alpha_0 - r_1 \cos(\omega_1 t + \varphi + \alpha_0) - \\ &- l_1 \sin \varphi + u_1 \cos \varphi \\ h_2 &= y_{o3} + r_2 \cos \psi_0 - r_2 \cos(\omega_2 t + \varphi + \psi_0) + \\ &+ l_2 \sin \varphi + u_2 \cos \varphi \\ h_3 &= y_{o3} - P \cos \varphi \end{aligned} \quad (9)$$

Потенціальна енергія пружної підвіски сепаратора знаходиться з виразу:

$$P_p = -\frac{C_1}{2}(\Delta_0^2 - \Delta_1^2) - \frac{C_2}{2}(\Delta_0^2 - \Delta_2^2), \quad (10)$$

де  $\Delta_0$  - початкова деформація пружин,  $\Delta_0 = \frac{Mg}{C}$ , для лівої підвіски -  $\Delta_1 = WF_1 - L_{np}$ , для правої -  $\Delta_2 = MQ_1 - L_{np}$

Лагранжиан даної механічної системи з врахуванням (2-4) запишеться наступним чином:

$$\begin{aligned} L &= \frac{M_k}{2}(\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) + \frac{1}{2}I\dot{\varphi}^2 + \frac{M_{D_1}}{2}(\dot{x}_{D_1}^2 + \dot{y}_{D_1}^2) + \\ &+ \frac{M_{D_2}}{2}(\dot{x}_{D_2}^2 + \dot{y}_{D_2}^2) - \left[ \frac{C_1}{2} \left( (L_1 N - L_{np})^2 - \left( -\left(\frac{Mg}{c}\right)^2 \right) \right) + \right. \\ &\left. + \frac{C_2}{2} \left( (R_1 M - L_{np})^2 - \left(\frac{Mg}{c}\right)^2 \right) + \right] \\ &+ M_{D_1}gh_1 + M_{D_2}gh_2 + M_Kgh_3 \end{aligned} \quad (11)$$

Продиференціювавши вирази та підставивши отримані похідні по кожній узагальненій координаті в рівняння Лагранжа II-го роду, зведемо їх до наступного вигляду:

$$\begin{cases} \ddot{x}_c + \omega^2 x_c = \mathcal{E}'_x(\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}, \omega_1 t + \alpha_0, \omega_2 t + \psi_0); \\ \ddot{y}_c + \omega^2 y_c = \mathcal{E}'_y(\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}, \omega_1 t + \alpha_0, \omega_2 t + \psi_0); \\ \ddot{\varphi} + \omega^2(t)\varphi = \mathcal{E}'_\varphi(\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}, \dot{x}_c, \dot{y}_c), \end{cases} \quad (12)$$

Рівняння (12) і буде математичною моделлю руху робочого контейнера вібраційного сепаратора.

Математична модель дає можливість дослідити різноманітні режими роботи вібросепаратора (вимк-

нення окремих віброзбудників, реверсування приводу, вплив сировини, яка сепарується, при збільшенні маси контейнера за рахунок збільшення маси завантаження), моделювати можливі нестационарні – резонансні режими, які можуть мати місце при роботі вібросепаратора. Використовуючи результати отримані вище, в рамках отриманих асимптотичних розв'язків, можна побудувати траєкторію руху довільної точки P сировини, яка сепарується відносно нерухомої системи координат в площині обертання віброзбудників.

Закон руху поперечного перерізу довільного шару сипкої сировини, що сепарується (наприклад, точки S (рис.1) – елементарної частинки шару сировини) відносно заданої системи координат XOY було знайдено з наступних міркувань:

а) рух точки S в системі координат  $\nu O_4 K$ , пов'язаної з досліджуванним шаром середовища можна представити рівняннями:

$$\begin{aligned} x_{s04}(t) &= \nu + u(\xi, t), \\ y_{s04}(t) &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

де  $\nu = O_4 P$  - положення елемента шару в початковий момент часу,  $u(\nu, t)$  - закон руху коливань шару сировини. Відповідно рівняння руху точки S відносно системи координат  $X_1 O_3 Y_1$ , пов'язаної з контейнером сепаратора матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} x'_{s03}(t) &= -w + (\nu + u(\nu, t)) \cos \beta, \\ y'_{s03}(t) &= q + (\nu + u(\nu, t)) \sin \beta, \end{aligned} \quad (14)$$

де  $w = KO_3$ ,  $q = KO_4$ ,  $\beta$  - кут нахилу сита сепаратора до дна контейнера. Дані параметри вибираються з геометричних міркувань, з врахуванням того, траєкторію руху якого шару чи точки сипкої сировини контейнера сепаратора необхідно дослідити.

Виходячи з наведених вище міркувань, рух елементарної частинки середовища S відносно системи координат XOY можна описати наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} x_{r1}(t) &= x_{03c}(t) - w \cos \varphi(t) - q \sin \varphi(t) + \\ &+ (\nu + u(\nu, t)) \cos(\varphi(t) + \beta), \\ y_{r1}(t) &= y_{03c}(t) - w \sin \varphi(t) + q \cos \varphi(t) + \\ &+ (\nu + u(\nu, t)) \sin(\varphi(t) + \beta), \end{aligned} \quad (15)$$

де

$$\begin{aligned} x_{03c}(t) &= x_{03}(t) + P \sin \varphi(t), \\ y_{03c}(t) &= y_{03}(t) - P \cos \varphi(t) \end{aligned}$$

- координати точки Mc (центра мас середовища відносно системи координат XOY),  $x_{03}(t)$ ,  $y_{03}(t)$ ,  $\varphi(t)$  - відповідно координати геометричного центра робочого контейнера сепаратора та кут його поворо-

ту під час руху (кут на який обертається системи координат  $X_1O_3Y_1$  відносно  $XOY$  (вирази для знаходження цих координат наведено в 13).

В кінцевому результаті матимемо:

$$\begin{aligned} x_S(t) &= x_{03}(t) + P \sin \varphi(t) - w \cos \varphi(t) - q \sin \varphi(t) + \\ &+ (v + u(v,t)) \cos(\varphi(t) + \beta), \\ y_S(t) &= y_{03}(t) - P \cos \varphi(t) - w \sin \varphi(t) + q \cos \varphi(t) + \\ &+ (v + u(v,t)) \sin(\varphi(t) + \beta), \end{aligned} \quad (16)$$

де  $P = O_3C$  - відстань від геометричного центру контейнера до центру мас середовища.

Таким чином, за допомогою системи рівнянь 16, використовуючи систему рівнянь 13 – опису руху геометричного центру контейнера сепаратора, та рівняння, які описують відносний колильний рух довільного шару (його поперечного перерізу) сировини у сепараторі можна побудувати абсолютну траєкторію руху та визначити амплітуду коливань системи шар сировини - контейнер сепаратора, а також будь-якої його точки, визначити вплив параметрів системи на амплітудні та амплітудно-частотні характеристики сипкої сировини. Отже, систему рівнянь (16) можна назвати абсолютною моделлю руху системи “вібро-сепаратор – сипка сировина”.

**Висновки.** Побудовані розрахункова схема та математична модель системи “вібросепаратор – сипка сировина” дають змогу дослідити вплив різних параметрів вібраційного сепаратора та шару сипкої сировини на процес сепарації та відповідно проводити їх регулювання для підвищення ефективності процесу. Також дані моделі можуть бути використані в процесах вібраційної обробки та транспортування.

#### Література

1. Лукьяненко В.М. Сепарация трудноразделимых семенных смесей. III Международная научно-техническая конференция “Сельскохозяйственные машины”. Харьков. XXIII Вып. 1. - 2015 г. – с. 95-98.
2. Назаренко І.І. Вплив кута нахилу робочої поверхні вібраційного грохота на ефективність його роботи. НУБА, Київ, Вып. 87. – 2016 р. – с. 69-73.
3. T. B. Linhares, C. B. Santos Vimieiro Analysis of the dynamic forces acting on a vibrating screen and its support structure using a scale model. *Measurement*. 2021. Vol. 176.
4. Ray Singh (2004) Vibratory separators still make the grade for screening dry bulk powders. *Filtration and Separation*. Vol.41. Iss.1. 20-21. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(04\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(04)00107-7)
5. Котов Б.І., Деревенько І.А., Степаненко С.П. Дослідження ефективності сепарації зернових матеріалів на ступінчасто-конічному решітці вібровідцентрових машин. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця. 2017р. Вып.2(85). с. 99-102.

6. Топільницький В.Г., Кусий Я.М., Ребот Д.П. Модель опису технологічного середовища оброблювальних систем вібраційного типу. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця. Вып.1(88). – с. 5 – 11.
7. Омелянов О.М. Обґрунтування впливу механічних коливань на процес обробки сипкої маси. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця. -2019. - Вып.2(93). – с. 68-74.
8. Стоцько З.А., Ребот Д.П., Топільницький В.Г. Визначення впливу властивостей сипкого середовища на ефективність сепарації. *Вісник НУЛП Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. Львів. 2018. – Вып.891. – с. 60 – 65.
9. З.А. Стоцько, В.Г. Топільницький, Я.М. Кусий Математична модель опису динаміки вібраційного сепаратора з дебалансним приводом. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2013. Вып. 47. - с.28-36

#### References

1. Lyk'ianenko V.M. (2015) Separacia trydnorazdelymyh semennyh smiesey. III Megdynarodnaia nauchnotekhnicheskaja konferenciia “Sielskohoziastvennye nayki” Kharkov. XXIII Vyp.1, 95-98. [In Russian]
2. Nazarenko I.I. (2016) Vplyv kyta nahuly robochoi poverhni vibraciinogo grokhota na efektyvnist' iogo roboty. NYBA, Kyiv, № 87, 69-73. [In Ukrainian]
3. T. B. Linhares, C. B. Santos Vimieiro Analysis of the dynamic forces acting on a vibrating screen and its support structure using a scale model. *Measurement*. 2021. Vol. 176.
4. Ray Singh (2004) Vibratory separators still make the grade for screening dry bulk powders. *Filtration and Separation*. Vol.41. Iss.1. 20-21. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(04\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(04)00107-7)
5. Stotsko Z.A., Rebot D.P., Topilnytsky V.G. (2018) Vyznachennia vplyvy vlastyvostei sypkogo seredovyscha na efektyvnist' separatsii. *Visnyk NYLP Optymizacia vyrobnychyh procesiv i technichnyy control y mashynobydyvanni ta prylyadobydyvanni*, 891, 60 – 65. [In Ukrainian]
6. Topilnytsky V.G., Kysyy Ya.M., Rebot D.P. (2019) Model' opysy tekhnologichnogo seredovyscha jbroblyuval'nyh system vibraciynogo typu. *Vibracii v tehnicii ta tehnologiyah*. 1(88), 5-11. [In Ukrainian]
7. Omelyanov O.M. (2019) Obgryntyvannya vplyvy mehanichnyh kolyvan' na proces obrobky sypkoi masy. *Vibracii v tehnicii ta tehnologiyah*. 2(93). 68 – 74 [In Ukrainian]
8. Kotov B.I., Dereven'ko I.A., Stepanenko S.P. (2017) Doslidzennya efektyvnosti separacii zernovyh materialiv na stypinchasto-konichnomu resheti vibrovidcentrovyyh mashyn. *Vibracii v tehnicii ta tehnologiyah*. 2(85). 99-102. [In Ukrainian]
9. Stotsko Z.A., Topilnytsky V.G., Kysyy Ya.M. (2013) Matematychna model' opysy dynamiky vibraciinogo separatora z debalansnym pryvodom. *Avtomatyzacia vyrobnychyh procesiv y mashynobydyvanni ta prylyadobydyvanni*. 47. 28 – 36. [In Ukrainian]

**Rebot D.P., Topilnytsky V.G. Mathematical model of system “Vibratory separator – loose material”**

*The process of vibrating separation is quite complex and depends on many factors. In particular, recent studies show that the efficiency of the process depends not only on the design parameters of the vibrating separator but also on their mutual influence and the characteristics of the bulk material. Therefore, the paper proposes to build a mathematical model of the system “vibrating separator - bulk material”*

*It is constructed the calculation scheme of the vibrating separator with two independently driven eccentric vibrators. Based on the scheme, it is considered that the vibrating separator performs only vertical oscillations in the plane of rotation of eccentric vibrators. A cylindrical vibrating separator is considered, due to the possibility of transmitting vibrations of greater force to the sieve and much more efficient use of the entire screening surface.*

*Also, a mathematical model of the motion of an arbitrary point of the system “vibrating separator - bulk material” is built. Methods of nonlinear mechanics and Lagrange equations of the second kind are used to build a mathematical model. The basis of the mathematical model of any point motion in the working container of the vibrating separator is taken the law of motion of the mass center. The obtained mathematical model makes it possible to investigate the influence of the parameters of the vibrating separator and the characteristics of the loose material on the efficiency and productivity of the separation process. Differential equations describing the motion of the geometric center of the separator*

*container and equations describing the motion of an arbitrary point of the loose material layer make it possible to construct the absolute trajectory of its motion and determine the effect of changing the amplitude-frequency characteristics of the vibrating separator on the natural frequency of loose material. Also, when substituting the necessary set parameters of the separator in the mathematical model, we obtain the equation for determining the amplitude and frequency of any point of the working container. The constructed mathematical models can also be used in other machines of vibration volumetric processing.*

**Key words:** *vibrating separator, bulk raw materials, mathematical model, amplitude, frequency.*

**Ребот Дарія Петрівна** – кандидат технічних наук, асистент кафедри «Проектування та експлуатація машин» Національного університету «Львівська політехніка» (м. Львів), e-mail: [dasha\\_kotlyarova@ukr.net](mailto:dasha_kotlyarova@ukr.net).

**Топільницький Володимир Григорович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Проектування та експлуатація машин» Національного університету «Львівська політехніка» (м. Львів), e-mail: [topilnvol@gmail.com](mailto:topilnvol@gmail.com).

Стаття подана 04.08.2021.