

DOI 10.20535/2707-2096.7.2022.267599  
УДК 621.867.52.2(0.43)

**С.В. Фелоненко, к.т.н., проф.**  
ORCID: 0000-0001-8270-9416

**В.В. Губкіна, ст. викладач**  
ORCID: 0000-0002-3811-3057

**О.П. Трофимова\*, ст. викладач**  
ORCID: 0000-0003-3511-780X

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»  
Дніпро, Україна

\*Відповідальний автор: trofymova.o.p@ntu.one

Стаття подана 14.09.2022; Стаття прийнята 28.10.2022

## ОБРОБКА СИПУЧИХ І СТРИЖНЕВИХ МАТЕРІАЛІВ У СПОЛУЧЕНИХ ПОСУДИНАХ

**Мета та завдання.** Проведення досліджень динаміки вібраційної установки для обробки сипучих та стрижневих матеріалів і кінематики їхнього руху (циркуляції) в камерах напівсферичного типу.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети проведено експертну оцінку існуючих підходів щодо методів обробки сипучих і стрижневих матеріалів в повітряному та рідинному середовищах.

**Основні результати.** Застосування вібрацій для теплового оброблення сипучих і стрижневих матеріалів дає змогу інтенсифікувати процес теплообміну, значно зменшити час оброблення, зберегти витрати палива, електроенергії, поліпшити якість продукції, знизити витрати на обслуговування та охорону довкілля. Наведено матеріали теоретичних досліджень динаміки вібраційної машини за різних видів коливань робочого органу та кількості віброприводів. Отримано аналітичні залежності параметрів коливань.

**Наукова новизна.** Застосування вібрацій при створенні високонадійних та ефективних технологічних агрегатів, які об'єднують виконання низькі технологічних операцій в одному пристрої.

**Висновки та практичне значення.** На основі аналізу вібромашин з рідинною та повітряною середою наведені результати досліджень, направлених на удосконалення технологій та відповідних технічних засобів для обробки сипучих, кускових та стрижневих матеріалів у повітряній та рідинних середовищах. В результаті рішення лінійних диференціальних рівнянь отримано параметри амплітуд, усталених коливань робочого органу установки з урахуванням переміщення точок робочих камер з урахуванням кутових коливань установки, отримано, що амплітуда вертикальних коливань точки дорівнює амплітуді колових коливань центра тяжіння установки. Отримані раціональні траєкторії коливань точок установки для визначення раціональних параметрів, виходячи з вимог технології обробки матеріалів. Розроблені методи розрахунку можна застосовувати при дослідженнях динаміки машини інших типів подібного класу, які містять в робочому просторі рідину. Конструкція установки дає змогу регулювати в широких межах амплітуду коливань і характер траєкторії точок робочого органу машини.

**Ключові слова:** стрижневий або сипучий матеріал, кінематика руху, обробка, вібраційні машини, траєкторії коливань, рідинне або повітряне середовище

## ВСТУП

Сушіння сипучих матеріалів переслідує різні цілі. Наприклад, при випалюванні в'язучих сушіння є початковою стадією загального процесу. Сушіння піску в ливарному виробництві

потрібне для отримання формувальної суміші з певною початковою вологістю. Сушіння зерна необхідне для забезпечення його якості під час зберігання. Сушіння різних мінеральних солей – для можливості їхнього зберігання, транспортування, а також для збереження якості, у машинобудуванні чимало деталей перед покриттям антикорозійними покриттями знежирують у спеціальних розчинах і потім піддають сушінню до певного відсотка вологості, у деяких технологіях виникає виробнича потреба одержати після обробки теплом, холодом або рідиною прямолінійні трубчасті або циліндричні стрижні.

**Актуальність теми.** Обробка теплом, холодом або рідиною – одна з найпоширеніших технологічних операцій, що трапляються майже в усіх галузях промисловості. Значну питому вагу серед усіх висушуваних матеріалів займають трубчасті, циліндричні, сипучі та кускові продукти.

Обробка входить до багатьох циклів виробництва під час підготовки сировини, обробки напівфабрикатів і отримання готової продукції.

У процесі сушіння вологі матеріали не тільки віддають вологу, а й набувають нових якостей. Паралельно з тепло- і масообмінним процесом у речовині можуть відбуватися структурно-механічні та біохімічні зміни. Раціональний метод сушіння, визначення оптимального режиму переміщення і вибір типу сушильної установки багато в чому визначають умовами отримання необхідних технологічних властивостей продукту. Ставлять дедалі вищі вимоги до кінцевого вмісту вологи та її рівномірного розподілу, запобігання зміні форми, хімічного вмісту та міцнісних властивостей матеріалу.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В галузі обробки сипучих, кускових матеріалів різної щільності існує ціла низька наукових досліджень, опубліковано декілька наукових робіт. Аналіз робіт показав, що результати в основному використовуються для сушки сільськогосподарської продукції [1]. Розглянуто процеси при сушінні нерівномірного шару матеріалу [2]. Існуючі технології обробки сипучих матеріалів не завжди є безперервним процесом, а більшою мірою, ступеневим [3], [4], [5]. Окрім традиційних методів обробки [6], [7], [8] вважаємо, що використання вібрацій більш ефективно тим, що можемо одержати розпушений шар від мінімального до максимального об'єму заповнення повітрям або рідиною між частинками матеріалу, який розпушується. При використанні та сполученні різних параметрів вібрацій (амплітуди, частоти коливань) ми можемо одержати необхідний результат як по якості, так і за часом обробки. У цих дослідженнях можуть бути використані, в тій чи іншій мірі, як при підготовчих процесах обробки матеріалу, так і до отримання готової продукції.

**Постановка завдання.** Проведення досліджень динаміки вібраційної установки для обробки трубчастих матеріалів і кінематики їхнього руху (циркуляції) в камерах напівсферичного типу.

Великого поширення набули вібраційні [2] установки з протяжним вантажонесучим робочим органом. Їхня робота заснована на круговому русі матеріалу, створюваному за допомогою вібрації.

Існуючі вібраційні установки являють собою різні апарати, що здійснюють коливання по круговій траєкторії. Ці машини дають змогу здійснювати переміщення матеріалу від одного агрегату до іншого з поєднанням процесу технологічної обробки і добре вписуються в складні схеми промислових установок. Здійснення цих процесів із застосуванням вібраційних машин і установок дає можливість при порівняно простих конструкціях агрегатів отримувати високу ефективність. Однак усі розглянуті установки розроблені для обробки сипучих і дисперсних матеріалів і не можуть бути використані для обробки стрижневих і трубчастих матеріалів.

Як застосований теплоносій можуть бути використані повітря, що надходить у шар матеріалу, нагріту рідину, нагрівальний корпус машини.

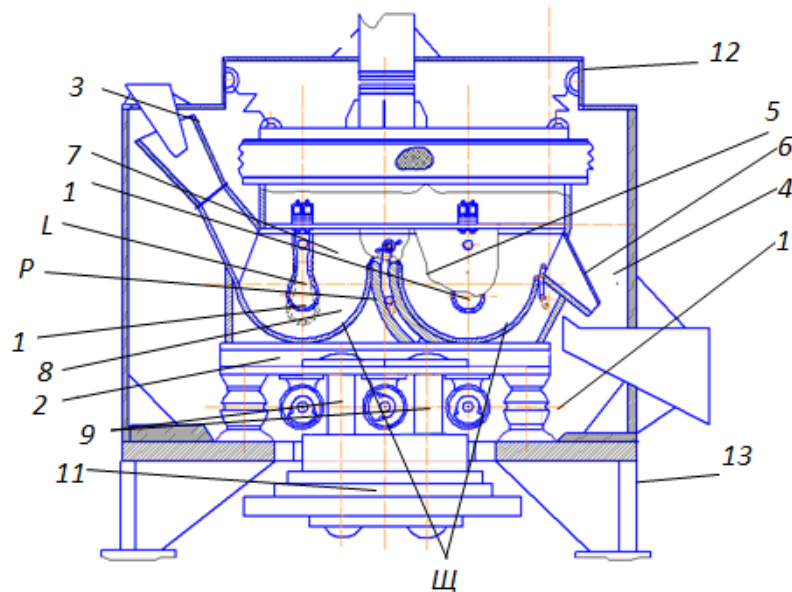
Найбільш прийнятним і дешевим способом є застосування електричних калориферів.

**Мета.** Проведення досліджень динаміки вібраційної установки для обробки сипучих та стрижневих матеріалів і кінематики їхнього руху (циркуляції) в камерах напівсферичного типу.

**Завдання досліджень.** Для досягнення поставленої мети проведено експертну оцінку існуючих підходів щодо методів обробки сипучих і стрижневих матеріалів в повітряному та рідинному середовищах.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

**Методика дослідження.** З огляду на ці обставини досить гостро стоїть питання про створення високонадійних і ефективних технологічних агрегатів, що зменшують виробничі площі шляхом поєднання низки технологічних операцій в одному пристрої. Для здійснення процесів сушіння, зневоднення та обробки сипучих різних сипучих, трубчастих і стрижневих матеріалів використання вібрацій є економічним та ефективним [9]. Це можливо здійснити на установці зі сполучними (двома або кількома) камерами (рис. 1) [10].



**Рисунок 1 – Установка для обробки сипучих і стрижневих матеріалів:**

*1 – перша камера; 1а – остання камера; 2 – несуча рама; 3;4 – завантажувальний і розвантажувальний лотки; 5 – середній шибер; 6 – розвантажувальний шибер; 7 – фігурна перегородка; 8 – отвори для подачі теплоносія; 9 – вібратори; 10 – амортизатори; 11 – врівноважувальний вантаж; 12 – нерухома парасолька; Щ – регульована щілина між першою і другою напівкамерами*

Оброблюваний матеріал завантажується в першу 1 камеру, проходить по черзі їх усі і вивантажується з останньої 1а (між першою і останньою камерами можуть бути проміжні). Уся конструкція встановлена на пружні опори-амортизатори 10 і приводиться в коливальний рух мотор-вібраторами 9 (розташування і кількість вібраторів може бути різною).

Верхня частина камер накривається нерухомою парасолькою 12, що сполучається з установкою за допомогою гнучкої щільної тканини і призначена для відведення через передбачені у верхній її частині патрубки випарів. Уся конструкція за допомогою амортизаторів встановлюється на нерухому раму 13.

Сипучий або трубчастий матеріал завантажувальним пристроєм 3 надходить до напівкамери L першої робочої камери 1 і, зазнаючи вібраційного впливу, переміщується під перегородкою 7 до напівкамери P, піддаючись тепловій обробці та обертаючись одночасно навколо своєї поздовжньої осі (для трубчастого матеріалу), поступово заповнюючи напівкамеру L камери 1а. Оскільки матеріал у напівкамерах циркулює з певною траєкторією за об'ємом камери, то він може перебувати в них доволі довго, піддаючись тепловій обробці.

Після закінчення процесу теплової обробки матеріал вивантажується через розвантажувальний жолоб 4. Для досягнення необхідної циркуляції матеріалу всередині

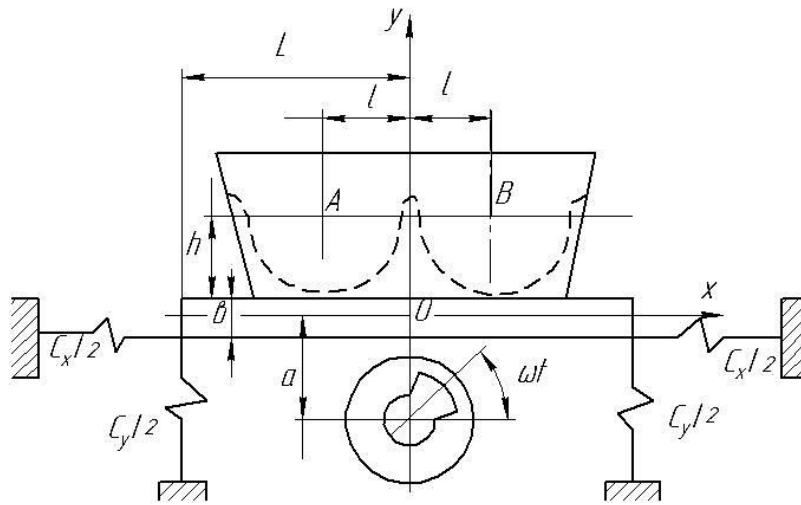
напівкамер II і I, а також для зміни їх відносного об'єму, перегородка 7 може зміщуватися ліворуч або праворуч, а пропускна здатність щілини Щ – підняттям або опусканням перегородки 7.

Тривалість перебування матеріалу встановлюється експериментально і за результатами можна визначити необхідну кількість камер для досягнення необхідної технології процесу [10].

*Динамічний розрахунок установки:*

**а) установка з одним мотор-вібратором**

У разі використання установки з одним мотор-вібратором, розміщеним у центрі мас системи, і під час роботи установки в зарезонансному режимі, достатню точність для практичних розрахунків, виходячи з розрахункової схеми рис. 2 [10], надає система лінійних рівнянь (1).



**Рисунок 2 – Динамічна схема установки**

$$\begin{aligned}
 M\ddot{x} + C_x x &= m_0 r \omega^2 \cos \omega t, \\
 M\ddot{y} + C_y y &= m r \omega^2 \sin \omega t, \\
 I\ddot{\varphi} + C_y L^2 \varphi + C_x b \varphi &= m_0 r a \omega^2 \cos \omega t
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де  $M, I$  – відповідно маса і момент інерції частин установки, що коливаються;  $m_0, r$  – маса дебаланса і його ексцентриситет щодо осі обертання;  $C_x, C_y$  – коефіцієнт жорсткості пружних елементів у напрямку осей  $X$  і  $Y$ ;  $a$  і  $b$  – відповідно відстань від центру ваги установки до осі обертання ротора вібробудника до верхньої опорної поверхні опорного елемента;  $L$  – відстань від вертикальної осі установки до осі пружного елемента;  $X$  и  $Y$  – проекції зміщення центру ваги установки відносно середнього положення;  $\varphi$  – кут повороту установки щодо середнього положення;  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора вібробуджувача;  $t$  – час.

Усталені коливання робочого органу установки згідно з рівняннями (1) будуть

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{m_0 r \omega^2}{p_x^2 \omega^2} \cos \omega t ; \quad Y = \frac{m_0 r \omega^2}{p_y^2 \omega^2} \sin \omega t ; \quad \varphi = \frac{m_0 r a \omega^2}{p_\varphi^2 \omega^2} \cos \omega t \\
 \text{Тут } P_x &= \frac{C_x}{M} ; \quad P_y = \frac{C_y}{M} ; \quad P_\varphi = \sqrt{\frac{C_x b + C_y L^2}{I}}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Відповідно частота власних коливань установки вздовж осей  $X$  і  $Y$  та відносно центральної осі.

У зарезонансному режимі роботи установки, коли частота вимушених коливань  $\omega$  у кілька разів перевищує частоту власних коливань установки, усталені коливання точок робочих камер будуть

$$x = -x_0 \cos \omega t; y = -y_0 \sin \omega t; \varphi = -\varphi_0 \cos \omega t, \quad (3)$$

де  $x_0 = y_0 = \frac{mr}{M} = R$ ;  $\varphi_0 = \frac{m_0 ra}{I}$  – відповідно амплітуда кругових і кутових коливань установки.

Проекції переміщень точок робочих камер з урахуванням кутових коливань установки (рис. 3) визначається:

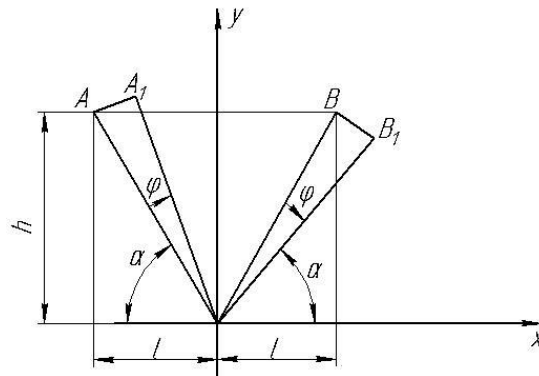


Рисунок 3 – До визначення точок робочої камери вздовж осей  $OX$  і  $OY$

а) для точки  $A$

$$x = -x_0 \cos \omega t + AA_1 \sin \alpha, y = -y_0 \sin \omega t + AA_1 \cos \alpha; \quad (3a)$$

б) для точки  $B$

$$x = -x_0 \cos \omega t + BB_1 \sin \alpha, y = -y_0 \sin \omega t - BB_1 \cos \alpha; \quad (4a)$$

де  $AA_1$  і  $BB_1$  – переміщення точок  $A$  і  $B$ ;  $\alpha = \arctg \frac{h}{l}$ , тут  $h$  і  $l$  – відповідно відстані від точок до осей  $X$  і  $Y$ .

Підставляючи в (3a) і (4a)  $AA_1 = OA \cdot \varphi$ ;  $BB_1 = OB \cdot \varphi$ ;  $\sin \alpha = \frac{h}{OA}$ ;  $\cos \alpha = \frac{l}{OA}$ ;  $OB = OA$ , отримуємо:

а) для точки  $A$

$$x = -x_0 \cos \omega t + h\varphi_0 \cos \omega t, y = -y_0 \sin \omega t + l\varphi_0 \cos \omega t;$$

б) для точки  $B$

$$x = -x_0 \cos \omega t + h\varphi_0 \cos \alpha, y = -y_0 \sin \omega t - l\varphi_0 \cos \omega t.$$

Після додавання гармонійних складових проекцій переміщень точок  $A$  і  $B$  відповідно будуть

$$x = X_0 \cos \omega t; x = Y_0 \sin(\omega t + \psi_A);$$

$$x = X_0 \cos \omega t; x = Y_0 \sin(\omega t + \psi_A);$$

де  $X_0 = (h\varphi_0 - x_0)$ ;  $Y_0 = \sqrt{(l\varphi_0)^2 + \phi_0}$  – відповідно амплітуди гармонійних коливань точок уздовж осей  $OX$  и  $OY$ ;  $\psi_A = -\arctg \frac{l\varphi_0}{y_0}$ ;  $\psi = \arctg \frac{l\varphi_0}{y_0}$  – кути зсуву фаз між фазовим кутом  $\omega t$  і переміщеннями точок  $A$  і  $B$  уздовж осі  $OY$ .

Для отримання рівнянь траєкторій точок  $A$  і  $B$  виключимо з рівнянь (3а) і (4а) час. Для цього перетворимо їх таким чином, щоб в одних частинах рівнянь були тільки члени, що містять  $\omega t$ . З рівнянь (3а) і (4а) отримуємо

$$\frac{X}{X_0} = \cos \omega t, \quad \frac{Y}{Y_0} = \sin \omega t \cos \psi_A + \cos \omega t \sin \psi_A, \quad (3б)$$

$$\frac{x}{X_0} = \cos \omega t, \quad \frac{y}{Y_0} = \sin \omega t \cos \psi_A + \cos \omega t \sin \psi_A, \quad (4б)$$

Вирішуючи рівняння (3б) і (4б) відносно  $\omega t$ , отримуємо

$$\frac{X}{X_0} = \cos \omega t, \quad \frac{\frac{y}{Y_0} - \frac{x}{X_0} \sin \psi_A}{\cos \psi_A} = \sin \omega t;$$

$$\frac{X}{X_0} = \cos \omega t, \quad \frac{\frac{y}{Y_0} - \frac{x}{X_0} \sin \psi_B}{\cos \psi_B} = \sin \omega t;$$

Після піднесення до квадрата і додавання отримаємо

$$\frac{X^2}{X_0^2} + \frac{Y^2}{Y_0^2} - 2 \frac{XY}{X_0 Y_0} \sin \psi_A = \cos^2 \psi_A; \quad \frac{X^2}{X_0^2} + \frac{Y^2}{Y_0^2} - 2 \frac{XY}{X_0 Y_0} \sin \psi_B = \cos^2 \psi_A;$$

$$Y_0^2 x^2 - 2X_0 Y_0 xy \sin \psi_A + X_0 y^2 - X_0^2 Y_0^2 \cos^2 \psi_A = 0;$$

$$Y_0^2 x^2 - 2X_0 Y_0 xy \sin \psi_B + X_0 y^2 - X_0^2 Y_0^2 \cos^2 \psi_B = 0. \quad C = x_0^2$$

Таким чином, рівняння траєкторії точок  $A$  і  $B$  має вигляд

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 - k = 0, \quad (5)$$

$$x = \bar{x} \cos \beta - \bar{y} \sin \beta; \quad x = \bar{x} \sin \beta + \bar{y} \cos \beta,$$

де  $A = Y_0^2$ ;  $B = -X_0 Y_0 \sin \psi$ ;  $C = x_0^2$  – коефіцієнти рівняння;  $k = -X_0^2 Y_0^2 \cos^2 \psi$  – вільний член.

Оскільки канонічне рівняння не містить членів із добутком координат, щоб позбутися коефіцієнта при  $X$  і  $Y$ , виконаємо поворот осей координат [4] на кут (рис. 4), замінивши  $X$  і  $Y$  в рівнянні (5) за формулами

$$x = \bar{x} \cos \beta - \bar{y} \sin \beta; \quad y = \bar{x} \sin \beta + \bar{y} \cos \beta.$$



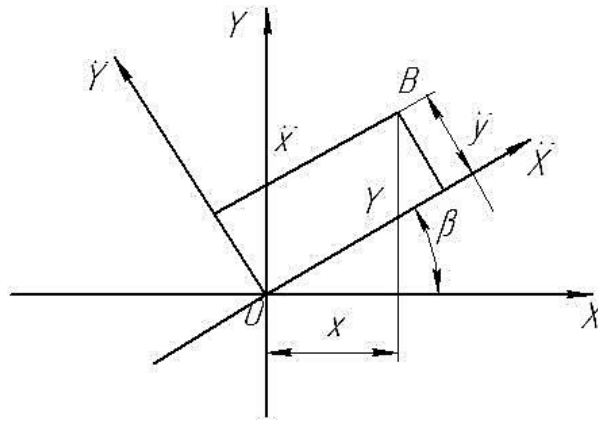


Рисунок 4 – До визначення положення осей еліпсів – траєкторій точок робочих камер

Отримуємо

$$A_1 \bar{x}^2 + 2B_1 \bar{x}\bar{y} + C_1 \bar{y}^2 + k = 0, \quad (6)$$

де:

$$A_1 = A \cos^2 \beta + 2Bx \cos \beta \sin \beta + C \sin^2 \beta + k;$$

$$B_1 = (C - A) \sin \beta \cos \beta + B(\cos^2 \beta - \sin^2 \beta);$$

$$C_1 = A \sin^2 \beta - 2B \cos \beta \sin \beta + C \cos^2 \beta;$$

$$k = -x_0^2 y_0^2 \cos^2 \psi;$$

При  $B_1 = 0$

$$(C - A) \sin \beta \cos \beta + B(\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) = 0;$$

$$\text{чи } \frac{(C + A)}{2} \sin 2\beta - B \cos 2\beta = 0;$$

звідки

$$\operatorname{tg} 2\beta = \frac{2B}{A - C}. \quad (7)$$

Після підстановки в рівняння (7) виразів  $A$ ,  $B$  і  $C$ , отримаємо кут повороту осі  $OX$ :

а) для точки  $A$

$$\beta = -\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2X_0 Y_0 \sin \psi_A}{Y_0^2 - X_0^2};$$

б) для точки  $B$

$$\beta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2X_0 Y_0 \sin \psi_B}{Y_0^2 - X_0^2}.$$

Замінюючи  $\sin \psi$  через  $\operatorname{tg} \psi$ , отримаємо кути нахилу великих еліпсів – траєкторій точок  $A$  і  $B$

$$\beta_A = \operatorname{arctg} \frac{2X_0 l \varphi_0}{Y_0^2 - X_0^2}; \quad \text{і} \quad \beta_B = -\operatorname{arctg} \frac{2X_0 l \varphi_0}{Y_0^2 - X_0^2}.$$

Після підстановки виразів  $X_0$ ;  $Y_0$ ;  $\varphi$  отримаємо

$$\beta_A = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2(ha - \rho^2)l}{(al^2 - ah^2 + 2hp^2)}.$$

Тут  $\rho = \sqrt{\frac{I}{M}}$  – радіус інерції установки щодо центральної осі.

Рівняння (6) при цьому набуває вигляду

$$A_1 \bar{x}^2 + C_1 \bar{y}^2 = -k^2. \quad (8)$$

Звідки

$$\frac{\bar{x}^2}{-\frac{k}{A_1}} - \frac{\bar{y}^2}{-\frac{k}{C_1}} = 1.$$

Тут  $\frac{k}{A_1}$ ,  $\frac{k}{C_1}$  відповідно квадрати великої та малої осей еліпсів – траєкторії точок  $A$  і  $B$ .

Після підстановки виразів  $A_1$  і  $C_1$  в (8) отримаємо вираз, що визначає відповідно більшу  $a_1$  і малу  $b_1$  вісь еліпсів

$$a_1 = \frac{X_0 Y_0 \cos \psi}{\sqrt{Y_0^2 \cos^2 \beta - 2X_0 Y_0 \sin \psi \cos \beta \sin \beta + X_0^2 \sin^2 \beta}} \quad (9)$$

$$b_1 = \frac{X_0 Y_0 \cos \psi}{\sqrt{Y_0^2 \sin^2 \beta + 2X_0 Y_0 \sin \psi \cos \beta \sin \beta + X_0^2 \cos^2 \beta}} \quad (10)$$

Положення прямої, паралельної осі  $OX$ , точки якої переміщуються тільки вздовж осі  $OY$ , визначається з рівнянь систем (3а) і (4а).

При  $X_0 = 0$ ;  $h\varphi_0 - x_0 = 0$ ;

Звідки

$$h = \frac{\rho^2}{a}. \quad (11)$$

Амплітуди вертикальних коливань

$$Y_0 = \frac{mr}{M\rho^2} \sqrt{l^2 a^2 + \rho^4}.$$

Після підстановки  $a$  з рівняння (11) отримуємо

$$Y_0 = \frac{mr}{Mh} \sqrt{\frac{l^2}{h^2} + 1}.$$

$$\text{При } l=0 \quad Y_0 = \frac{mr}{M}.$$

Тобто амплітуда вертикальних коливань точки дорівнює амплітуді кругових коливань центру ваги установки.

**б) установка з двома мотор-вібраторами**

У разі встановлення на раму двох мотор-вібраторів, ротори яких обертаються в одному напрямку, система лінійних рівнянь (1) набуває вигляду



$$\begin{aligned}
 M\ddot{x} + C_x x &= 2m_0 r \omega^2 \cos \omega t, \\
 M\ddot{y} + C_y y &= 2m_0 r \omega^2 \cos \omega t, \\
 I\ddot{\varphi} + C_y L^2 \varphi + C_x b y &= 2m_0 r a \omega^2 \cos \omega t.
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Отже, в за резонансному режимі роботи установки, амплітуди кругових і кутових коливань будуть удвічі більшими. Удвічі будуть більшими амплітуди  $X_0$  і  $Y_0$ . Кути  $\psi_A$  і  $\psi_B$  зсуву фаз між фазовим кутом  $\omega t$  і переміщеннями точок уздовж осі  $OY$  залишаться колишніми. Не змінять своїх значень і кути нахилу великих осей еліпсів ( $\beta_A$  і  $\beta_B$ ).

#### в) установка з трьома мотор-вібраторами

У разі встановлення на раму трьох мотор-вібраторів таким чином, що ротори крайніх мотор-вібраторів обертаються в рівних напрямках, система лінійних рівнянь (1) набуде вигляду

$$\begin{aligned}
 M\ddot{x} + C_x x &= m_0 r \omega^2 \cos \omega t, \\
 M\ddot{y} + C_y y &= 2m_0 r \omega^2 \sin \omega t, \\
 I\ddot{\varphi} + C_y L^2 \varphi + C_x L y &= m_0 r a \omega^2 \cos \omega t.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Таким чином, траєкторії коливань точок установки будуть являти собою еліпси, більш витягнуті у вертикальному напрямку.

#### г) установка з круговими коливаннями робочого органу

Для отримання кругових коливань установки, як видно з виразу (1), центр мас установки повинен збігатися з точкою на осі ротора вібратора. Для отримання кругових коливань у нижній частині установки передбачені противаги, маса яких і відстань від осі вібратора визначається з виразу:

$$m_{np} \cdot a_n p = Ma. \tag{14}$$

### **ВИСНОВКИ та перспективи подальших досліджень.**

На підставі аналізу аналогів машин і механізмів, визначено технічні протиріччя наявних конструкцій машин для сушіння різних матеріалів, конкретизовано завдання досліджень. Таким чином, конструкція установки дає змогу регулювати в широких межах амплітуду коливань і характер траєкторії точок робочого органу машини. В результаті рішення лінійних диференціальних рівнянь отримано параметри амплітуд, усталених коливань робочого органу установки з урахуванням переміщення точок робочих камер з урахуванням кутових коливань установки.

При рішенні рівнянь траєкторії точок центрів камер, з урахуванням кута повороту осей координат на визначений кут, отримано, що амплітуда вертикальних коливань точки дорівнює амплітуді колових коливань центра тяжіння установки.

Отримані результати поля траєкторії точок корпусу вібратора при різних видах складання коливань від різноманітного числа вібраторів. Отримані раціональні траєкторії коливань точок установки для визначення раціональних параметрів, виходячи з вимог технології обробки матеріалів. Розроблені методи розрахунку можна застосовувати при дослідженнях динаміки машини інших типів подібного класу, які містять в робочому просторі рідину. Конструкція установки дає змогу регулювати в широких межах амплітуду коливань і характер траєкторії точок робочого органу машини.

На основі теоретичних та експериментальних напрацювань планується проведення наступних теоретичних та експериментальних досліджень:

- переробка та класифікація шлакових матеріалів вугільних та рудних шахт, металургійних та інших підприємств;
- класифікація сипучих матеріалів по крупності;

- перемішування різних по крупності та хімічному складу сипучих матеріалів;
- розмежування по крупності сипучих матеріалів по вертикалі;
- покриття захисною плівкою кускових матеріалів та металевих виробів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. О. Євженко, В. П. Міхалевич, Л. І. Березняк, "Установка для сушіння сипучого матеріалу, переважно зерна", Пат. 8738 Україна, МПК (2006.01) F 26 В 17/12, Серп. 15, 2005.
- [2] Я. М. Ханік, Г. О. Мазяр, І. О. Гузьова, Я. Д. Ярош, "Гідродинаміка при сушінні нерівномірного нерухомого шару дисперсного матеріалу", *Журнал Науковий вісник НЛТУ України*, вип. 18.3, с. 104-107, 2008.
- [3] В. М. Голубець, І. М. Озарків, Й. Л. Ацбергер, "Теплообмін у процесі сушіння сипучих матеріалів з деревини у киплячому шарі", *Журнал Науковий вісник НЛТУ України*, вип. 13.1, с. 93-100, 2003.
- [4] Ю. В. Карнаушенко, "Пути развития основных способов сушки и методы их интенсификации", *Статистичний збірник Рибне господарство України*, № 1, с. 26-28, 2010.
- [5] М. В. Назаренко, Б. Ю. Собко, В. В. Лотоус, Д. В. Вінівітін, О. О. Азюковський, О. В. Ложніков, О. С. Ковров, О. М. Лазніков, *Геоінформаційні технології на відкритих гірничих роботах для оптимізації процесів видобутку і переробки корисних копалин: монографія*, Дніпро: Журфонд, 2020.
- [6] Т. В. Лазарев, А. Я. Карвацький, Є. М. Панов, *Закономірності процесу високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах: монографія*, Київ : НТУУ «КПІ», 2016.
- [7] М. П. Юхименко, С. В. Вакал, М. П. Кононенко, А. П. Філонов, *Апарати зваженого шару. Теоретичні основи і розрахунок*. Суми: Собор, 2003.
- [8] І. О. Мікульонюк, *Обладнання і процеси перероблення термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини : монографія*, Київ : ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2009.
- [9] Wen-Ching Yang, *Handbook of fluidization and fluid-particle systems*. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [10] С.В. Фелоненко, *Динаміка та методи розрахунку вібраційних машин для обробки сипучих матеріалів в рідинному та повітряному середовищах: монографія*, Дніпро, НГУ, 2017.

S. Felonenko, Cand. Sc. (Tech.), Prof.

ORCID: 0000-0001-8270-9416

V. Gubkina, Senior Lecturer

ORCID: 0000-0002-3811-3057

O. Trofymova\*, Senior Lecturer

ORCID: 0000-0003-3511-780X

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

\*Corresponding author: trofymova.o.p@nmu.one

Received 14.09.2022; Accepted 28.10.2022

### PROCESSING OF BULK AND ROD MATERIALS IN COMBINED VESSELS

**Purpose and task** is making research on the dynamics of a vibrating installation to process tubular materials and the kinematics of their movement (circulation) in hemispherical chambers.

**Methodology.** To achieve the target goal, an expert assessment of existing approaches to methods of processing bulk and rod materials in air and liquid environments has been carried out.

**Research methods.** Using vibrations for heat treatment of bulk and tubular materials makes it possible to intensify the heat exchange process, significantly reduce processing time, save fuel and electricity consumption, improve product quality, reduce costs on maintenance and environmental protection. The materials of theoretical studies on vibrating machine dynamics under different types

of working body oscillations and the number of vibration drives are presented. Analytical dependences of vibration parameters have been obtained.

**The main results.** Using vibrations to develop highly reliable and efficient technological units incorporating the performance of low technological operations in one device.

**Conclusions and practical significance.** Based on the analysis of vibrating machines with a liquid environment, the results of research aimed at improving technologies and appropriate technical means to process bulk, lump and rod materials in air and liquid environments are provided. The solution of linear differential equations resulted in obtaining amplitude parameters of steady oscillations of an installation working body with relevance to the movement of working camera points and the installation angular oscillations as well. It has been proved that the amplitude of the vertical oscillations of the point is equal to the amplitude of the circular oscillations of the installation gravity center. Obtained rational trajectories of installation point oscillations to determine rational parameters are based on the requirements of material processing technology. The developed calculation methods can be used while studying machine dynamics of other types of a similar class containing liquid in the working space. Installation design makes it possible to adjust the oscillation amplitude and the nature of the trajectory of the installation working body points within wide limits.

**Keywords:** rod or bulk material, motion kinematics, processing, vibrating machines, vibration trajectories, liquid, or air environment.

## REFERENCE

- [1] V. O. Yevzhenko, V. P. Mikhalevich, L. I. Berezhnyak, " Ustanovka dlia sushinnia sypuchoho materialu, perevazhno zerna ", Pat. 8738 Ukraine, MPC (2006.01) F 26 B 17/12, Aug. 15, 2005.
- [2] Y. M. Khanyk, G. O. Mazhar, I. O. Guzyova, Y. D. Yarosh, "Hydrodynamics at the process of drying steady-state layer of dispersive material", *Scientific Bulletin of UNFU*, v. 18.3, pp. 104-107, 2008.
- [3] V. M. Holubets, I. M. Ozarkiv, Y. L. Acberger, "Heat exchange in the process of bulk materials drying from wood in a boiling layer", *Scientific Bulletin of UNFU*, v.13.1, pp. 93-100, 2003.
- [4] Yu. V. Karushenko, "Paths of development of the main methods of drying and methods of their intensification", *Statistical collection Fisheries of Ukraine*, № 1, pp. 26-28, 2010.
- [5] M. V. Nazarenko, B. Yu. Sobko, V. V. Lotous, D. V. Vinivitin, O. O. Azyukovsky, O. V. Lozhnikov, O. S. Kovrov, O. M. Laznikov, *Geoinformation Technologies on open-pit mining operations to optimize mineral extraction and processing processes: monograph*, Dnipro: Zhurfond, 2020.
- [6] T. V. Lazarev, A. Ya. Karvatskii, E. M. Panov, *Regularities of the process of high-temperature processing of bulk carbon materials in electric furnaces: monograph*, Kyiv: NTUU "KPI", 2016.
- [7] М. П. Юхименко, С. В. Вакал, М. П. Кононенко, А. П. Філонов, *Апарати зваженого шару. Теоретичні основи і розрахунок*. Суми: Собор, 2003.
- [8] I. O. Mikulonok, *Obladnannia i protsesy pereroblennia termoplastychnykh materialiv z vykorystanniam vtorynnoi syrovyny: monograph*, Kyiv: IVC Publishing House "Polytechnic", 2009.
- [9] Wen-Ching Yang, *Handbook of fluidization and fluid-particle systems*. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [10] S.V. Felonenko, *Dynamika ta metody rozrakhunku vibratsiinykh mashyn dlia obrobky sypuchykh materialiv v ridynnomu ta povitriannomu seredovyschakh: monograph*, Dnipro, NSU, 2017.