

**Шоловій Ю.П.**

к.т.н., доцент

Магерус Н.І.

к.т.н., асистент

**Національний
університет «Львівська
політехніка»****Sholoviy Yu.****Magerus N.****Lviv Polytechnic National
University****УДК 621.929.7****АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ВИТІКАННЯ
ДРІБНОДИСПЕРСНОГО
СИПКОГО МАТЕРІАЛУ З
КОНІЧНОЇ ЛУНКИ ДОЗАТОРА ПІД
ДІЄЮ ВІБРАЦІЇ**

Розглянуто моделювання процесу витікання дрібнодисперсного сипкого матеріалу з конічної розвантажувальної лунки бункера при вібраційному збуренні потоку конічним днищем на основі моделі Лоренца, яка дозволяє описати поведінку сипкого продукту під дією вібрації. Оскільки дрібнодисперсний сипкий матеріал під впливом механічних коливань поводить себе аналогічно рідині, то найефективнішим способом одержання моделі Лоренца було її виведення із рівнянь Нав'є-Стокса. Проаналізовано динаміку витікання сипкого матеріалу, вплив параметрів лунки та режимів вібрації на ефективність процесу витікання.

Ключові слова: розвантажувальна лунка, сипкий матеріал, вібраційне днище, витікання, параметри лунки, режими коливань.

Постановка проблеми. Дозування дрібнодисперсних сипких матеріалів (СМ) супроводжується певними труднощами, пов'язаними із утворенням грудок, нестабільною насипною щільністю, нерівномірністю витікання тощо. Зменшити ці негативні явища можна застосуванням динамічної дії вібрації на продукт дозування. Змінюючи інтенсивність коливань можна покращувати умови руху та витікання СМ у процесі дозування [1]. Це особливо актуально для розвантажувальної лунки бункера, де спостерігається ущільнення продукту дозування та погіршення умов його витікання. Розробка математичної моделі поведінки продукту під дією вібрації дасть можливість на етапі створення обладнання спрогнозувати рух СМ, а також дослідити вплив на нього геометрії лунки. Тому підбір оптимальних режимів та конструктивних параметрів конічної розвантажувальної лунки бункера для дрібнодисперсних матеріалів є на сьогоднішній день актуальним завданням, вирішення якого дозволить підвищити ефективність процесу дозування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для дослідження поведінки дрібно-дисперсного СМ у конічній лунці дозатора використано модель суцільного середовища, що найбільш адекватно відображає суть процесу вібраційного дозування продукту [4]. Під впливом вібрації

СМ може перебувати у трьох можливих станах: попереднього ущільнення, циркуляційних і хаотичних рухів. Модель Лоренца дозволяє із достатньою точністю описати поведінку продукту у стані віброзрідження чи віброкипіння [2].

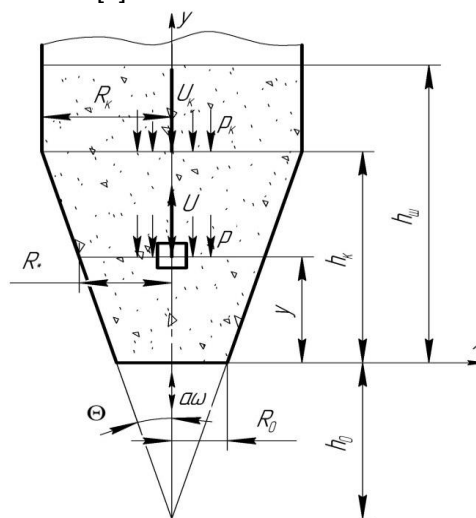


Рис. 1. Розрахункова схема поведінки СМ під дією вібрації

Оскільки дрібнодисперсний СМ під впливом механічних коливань поводить себе аналогічно рідині, то найефективнішим способом одержання моделі Лоренца є її виведення із рівнянь Нав'є-Стокса (1) згідно з розрахунковою схемою (рис. 1):



$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial V_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right) - V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} - V_y \frac{\partial V_x}{\partial y}, \\ & \frac{\partial V_y}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right) - V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} - V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + g \left(\frac{\rho}{\rho_u} + \frac{\rho_n}{\rho_u} - 1 \right) + \frac{6g\rho k f (h_k - y)}{d_u \rho_u} \times \\ & \times \text{sign}(V_y - a\omega \cos(\omega t) e^{-\varepsilon y}) + \frac{3C_n \rho_n}{4d_u \rho_u} \cdot \left| U_0 e^{-\delta y} \cdot \sin(\omega t) - V_y \right| \cdot \text{sign}(U_0 e^{-\delta y} \cdot \sin(\omega t) - V_y) + \\ & + \frac{6\sigma_n \cos(\Theta_k)}{\left(1 + \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \right) d_u^2 \rho_u} \cdot \text{sign}(V_y - a\omega \cos(\omega t) e^{-\varepsilon y}), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де V_x і V_y – горизонтальна і вертикальна компоненти швидкості СМ, t – час, ρ – насипна щільність СМ, p – тиск СМ, ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості СМ, g – пришвидшення земного тяжіння, ρ_n – густина повітря, ρ_u – густина частинки СМ, k – коефіцієнт рухливості матеріалу, f – коефіцієнт внутрішнього тертя матеріалу, y – текуча координата частинки СМ, h_k – висота шару СМ, що піддається впливу вібрації, ε – коефіцієнт затухання коливань в СМ, δ – коефіцієнт затухання швидкості повітряного потоку, a і ω – амплітуда і частота коливань,

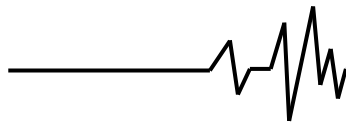
d_u – умовний діаметр частинки СМ, C_n – коефіцієнт опору повітря, U_0 – амплітудне значення швидкості руху повітря у бункері, σ_n – поверхневий натяг води, Θ_k – крайовий кут змочування поверхні, β – кут, що вказує на кількість води у СМ.

При зведенні рівняння Нав'є-Стокса до моделі Лоренца використано методику [2]. Для одержання розв'язку системи рівнянь (1) записано граничні умови:

$$\begin{aligned} y = 0, V_y = 0, y = h, V_y = 0, p_k = 0, \\ x = \pm R, V_y = a_y \cdot \cos(\omega t), V_x = a_x \cdot \sin(\omega t). \end{aligned} \quad (2)$$

Здійснивши необхідні перетворення [3] отримано систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial V_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial V_x}{\partial x} \cdot V_x - \frac{\partial V_x}{\partial y} \cdot V_y, \\ & \frac{\partial V_y}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial V_y}{\partial x} \cdot V_x - \frac{\partial V_y}{\partial y} \cdot V_y + \\ & + g \left(\frac{\rho}{\rho_u} + \frac{\rho_n}{\rho_u} - 1 + C(y) + \frac{dC(y)}{dy} y \right) + \frac{6g\rho k f}{d_u \rho_u} \cdot (h_k - y) + \frac{3C_n \rho_n}{4d_u \rho_u} \cdot (U - V_y)^2 + \\ & + \frac{6\sigma_n \cos(\Theta_k)}{\left(1 + \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \right) \cdot d_u^2 \cdot \rho_u} - \eta g \zeta \cdot \left(C(y) + \frac{dC(y)}{dy} \cdot y \right) - \frac{p_k}{\rho_0} \cdot \frac{dC(y)}{dy}, \\ & \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0, \\ & \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \gamma \cdot \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right) - V_x \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\Delta U}{h_k} \cdot V_y, \end{aligned} \right. \quad (3)$$



де \tilde{p} – відхилення тиску СМ від динамічного, η – коефіцієнт розширення СМ від швидкості повітряного потоку U , ζ – відхилення швидкості повітряного потоку від лінійного профілю, $C(y) = \frac{1}{\left(\frac{R_k}{R}\right)^2 + 1 - \left(\frac{R}{R_k}\right)^2}$,

$R_k = R_0 + h_k \cdot \tan(\Theta)$, $R = R_0 + y \cdot \tan(\Theta)$, R_0 – радіус випускного отвору бункера.

Для подальшого зведення моделі до системи Лоренца зроблено припущення, що СМ під дією вібрації здійснюватиме циркуляційні рухи у вигляді псевдокомірок Бенара з урахуванням параметрів лунки [5]. Відхилення швидкості повітряного потоку записано у вигляді подвійного ряду Фур'є:

$$\zeta(x, y, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} V_{mn}(t) \cdot \cos(m \cdot \alpha \cdot x) \cdot \sin(n \cdot \beta \cdot y), \quad (4)$$

де $V_{mn}(t)$ – періодична функція подвійного ряду Фур'є, $\alpha = \frac{\pi}{R_k}$ і $\beta = \frac{\pi}{h_k}$ – коефіцієнти подвійного ряду Фур'є.

Із умови неперервності випливає, що компоненти швидкості руху СМ V_x і V_y

повинні виражатись через похідні від однієї функції $\psi(x, y, t)$ – функції току Стокса:

$$V_x = -\frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad V_y = \frac{\partial \psi}{\partial x}.$$

Враховуючи особливості циркуляційних контурів функція току Стокса матиме вигляд:

$$\psi(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} K_{mn}(t) \cdot \sin(m \cdot \alpha \cdot x) \cdot \sin(n \cdot \beta \cdot y), \quad (5)$$

де $K_{mn}(t)$ – коефіцієнт функції потоку Стокса. Вирази для визначення компонент швидкості

СМ V_x і V_y з урахуванням рівняння (5) можна представити як:

$$\begin{aligned} V_x(x, y, t) &= -\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \beta \cdot K_{mn}(t) \cdot \sin(m \cdot \alpha \cdot x) \cdot \cos(n \cdot \beta \cdot y), \\ V_y(x, y, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} m \cdot \alpha \cdot K_{mn}(t) \cdot \cos(m \cdot \alpha \cdot x) \cdot \sin(n \cdot \beta \cdot y). \end{aligned} \quad (6)$$

Підставивши вирази (4) і (6) у систему (3), отримано нескінченну систему рівнянь для коефіцієнтів $V_{mn}(t)$ і $K_{mn}(t)$. Без порушення точності розрахунків із системи рівнянь (3) відкинуто члени, що несуттєві при

одержанні моделі Лоренца. Систему Лоренца можна отримати, якщо вважати суттєвими члени $K_{11}(t)$, $V_{11}(t)$, $V_{02}(t)$ [3]:

Після виконання спрощень система рівнянь (3) набуває вигляду [3]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{D \cdot B}{A} \cdot \frac{\eta \cdot g \cdot \alpha \cdot y_1}{\alpha^2 + \beta^2} \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho_c} + C(y) + \frac{dC(y)}{dy} \cdot y \right) - \nu \cdot D \cdot x_1 \cdot (\alpha^2 + \beta^2), \\ \dot{y}_1 = -D \cdot \gamma \cdot y_1 \cdot (\alpha^2 + \beta^2) + \frac{A \cdot D}{B} \cdot x_1 \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta U}{h_k} + 2 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \frac{A \cdot C \cdot D}{B} \cdot x_1 \cdot z_1, \\ \dot{z}_1 = \frac{A \cdot B \cdot D}{C} \cdot \frac{\alpha \cdot \beta}{2} \cdot x_1 \cdot y_1 - 4 \cdot \gamma \cdot D \cdot z_1 \cdot \beta^2. \end{cases} \quad (7)$$



Систему Лоренца можна одержати, якщо коефіцієнти A, B, C, D будуть наступні:

$$A = \frac{\gamma \cdot (\alpha^2 + \beta^2)}{\alpha \cdot \beta}; B = \frac{v \cdot \gamma \cdot (\alpha^2 + \beta^2)^3}{\alpha^2 \cdot \beta \cdot \eta \cdot g \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho_u} + C(y) + \frac{dC(y)}{dy} \cdot y \right)};$$

$$C = \frac{v \cdot \gamma \cdot (\alpha^2 + \beta^2)^3}{2 \cdot \alpha^2 \cdot \beta \cdot \eta \cdot g \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho_u} + C(y) + \frac{dC(y)}{dy} \cdot y \right)}; D = \frac{1}{\gamma \cdot (\alpha^2 + \beta^2)}$$
(8)

Отже, модель Лоренца набуває вигляду:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \sigma(y_1 - x_1), \\ \dot{y}_1 = r \cdot x_1 - y_1 + x_1 \cdot z_1, \\ \dot{z}_1 = x_1 \cdot y_1 - b \cdot z_1. \end{cases}$$
(9)

де безрозмірні параметри будуть мати вигляд:

$$\sigma = \frac{v}{\gamma}, \quad r = \frac{\alpha^2 \cdot \eta \cdot g \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho_u} + C(y) + \frac{dC(y)}{dy} \cdot y \right)}{v \cdot \gamma \cdot (\alpha^2 + \beta^2)^3} \cdot \frac{\Delta U}{h_k}, \quad b = \frac{4 \cdot \beta^2}{\alpha^2 + \beta^2}$$
(10)

Для уніфікація параметра σ коефіцієнт затухання швидкості повітряного потоку прийнято рівним:

$$\gamma = \frac{v^2}{a\omega h_k}.$$
(11)

Використавши досвід моделювання поведінки СМ під дією вібрації з допомогою системи Лоренца параметри моделі приведено до вигляду [2]:

$$\sigma = \frac{a\omega h_k}{v}, \quad r = K \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho_u} + C(y) + \frac{dC(y)}{dy} \cdot y \right) \cdot \frac{a\omega^2}{g}, \quad b = \frac{4}{\left(\frac{h_k}{R_k} \right)^2 + 1}$$
(12)

Як показує практика, зміна швидкості повітряного потоку ΔU по висоті шару СМ, коефіцієнт розширення матеріалу від швидкості повітряного потоку η , кінематична в'язкість ν є тісно пов'язані із параметрами вібрації a і ω та геометричними розмірами лунки h_k і R_k [5]. Значення цього коефіцієнта при зміні геометрії лунки і режимів дозування є практично незмінним $K \approx 1$.

Характерним показником вібрації, що визначає рух матеріалу, є інтенсивність вібрації $a\omega^2$. При $a\omega^2/g < 1$ спостерігається ущільнення матеріалу. При $a\omega^2/g \geq 1$ у конічній лунці дозатора спостерігаються впорядкований рух середовища у вигляді

циркуляційних потоків (віброкипіння. При значному збільшенні інтенсивності вібрації $a\omega^2/g \gg 1$ циркуляційні рухи переходять у хаос.

Використання моделі Лоренца дозволяє підібрати режими вібрації, що забезпечують ефективну роботи вібраційних дозаторів. Модель Лоренца дозволяє функціонально пов'язати параметри σ, r, b із режимами роботи вібраційної машини a і ω , а також геометрією лунки R_0, h_k, Θ . Характерним показником у моделі Лоренца, в якому поєднані параметри вібрації та геометрії розвантажувальної лунки, є параметр

$$r = \left(E + \frac{\rho_0}{\rho_u} \right) \cdot \frac{a\omega^2}{g}.$$

Як уже зазначалось,



при $r < r^*$ спостерігається ущільнення матеріалу, при $r \geq r^*$ – розрихлення продукту і, відповідно, його безперервне та рівномірне витікання [5]. Із математичної моделі отримано

$$\xi = \frac{r^*}{\frac{1}{\left(\frac{R_{\kappa}}{R}\right)^2 + 1 - \left(\frac{R}{R_{\kappa}}\right)^2} + \frac{2 \tan(\Theta) \cdot \left(\frac{R_{\kappa}^2}{R^3} + \frac{R}{R_{\kappa}^2}\right)}{\left(\left(\frac{R_{\kappa}}{R}\right)^2 + 1 - \left(\frac{R}{R_{\kappa}}\right)^2\right)^2} \cdot y + \frac{\rho_0}{\rho_u}} \quad (13)$$

Для аналізу динаміки витікання було обрано пшеничне борошно із наступними фізико-механічними властивостями:

$\rho_0 = 0,6 \cdot 10^3$ кг/м³; $\rho_u = 0,8 \cdot 10^3$ кг/м³. Чим менший розмір частинок СМ, що дозується, тим вище значення параметра r^* моделі Лоренца, при якому гарантуються нормальні умови витікання. Для даного СМ обрано $r^* = 8$. При моделюванні розглянуто варіант повного завантаження конічної лунки дозатора, при якому висота шару продукту h рівна висоті h_{κ} розвантажувальної лунки дозатора, тобто виконується умова $h = h_{\kappa}$. З метою отримання залежностей $\xi(R_0)$ конструктивно прийнято, що $y = 0,05$ м; $h_{\kappa} = 0,6$ м.

Для дрібнодисперсного СМ із заданими властивостями оптимальне значення кута нахилу лунки $\Theta \leq 36^\circ$, тому залежності $\xi(R_0)$ побудовано для $\Theta = 35^\circ$ та $\Theta = 10^\circ$. Використавши задані вхідні параметри та рівняння (13), у програмному середовищі MathCAD отримано графіки $\xi(R_0)$ (рис. 2).

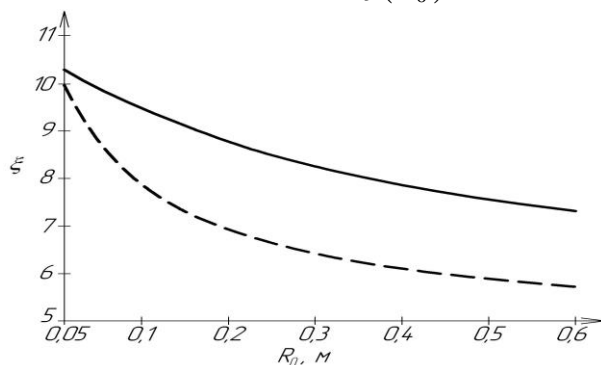


Рис. 2. Залежність $\xi(R_0)$ (— — для $\Theta = 10^\circ$, — — для $\Theta = 35^\circ$)

формулу, що дозволяє встановити залежність параметру перевантаження ξ від геометричних розмірів розвантажувальної лунки дозатора:

Аналізуючи графічні залежності (рис. 2), можна зробити висновок, що зростання радіусу випускного отвору R_0 , що відповідає розміру коливного днища, призводить до збільшення площі поширення вібрації. Це спричиняє зменшення параметру перевантаження ξ , що необхідний для забезпечення рівномірного та безперервного витікання дрібнодисперсного СМ, і, тим самим, підвищення ефективності роботи вібраційного об'ємного дозатора. А також, чим менший кут нахилу стінок розвантажувальної лунки Θ , тим істотніше впливає радіус випускного отвору R_0 розвантажувальної лунки на параметр перевантаження ξ .

Значний вплив на ефективність роботи вібраційного дозатора має висота шару h , що видно з графічних залежностей параметра перевантаження від висоти лунки дозатора $\xi(h_{\kappa})$ для $R_0 = 0,05$ м та $R_0 = 0,2$ м (рис. 3).

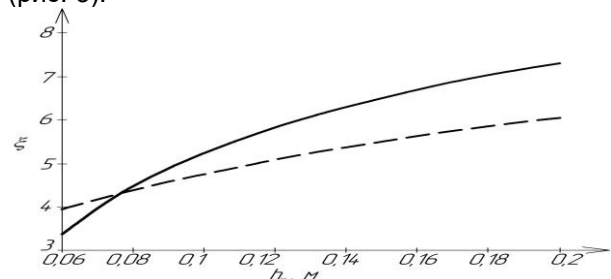


Рис. 3. Залежність $\xi(h_{\kappa})$ (— — для $R_0 = 0,05$ м; — — — для $R_0 = 0,2$ м)

Аналіз залежностей (рис. 3) дозволяє стверджувати, що при збільшенні висоти лунки h_{κ} збільшується інтенсивність вібрації $a\omega^2$, що необхідна для досягнення СМ стану віброкипіння. Із збільшенням радіусу випускного отвору R_0 розвантажувальної лунки дозатора динамічна система стає менш чутливою до



зміни висоти шару матеріалу h_k , оскільки збільшується площа дії вібрації.

На характер руху дрібнодисперсних СМ під дією вібрації впливає кут нахилу стінок Θ_1 розвантажувальної лунки дозатора.

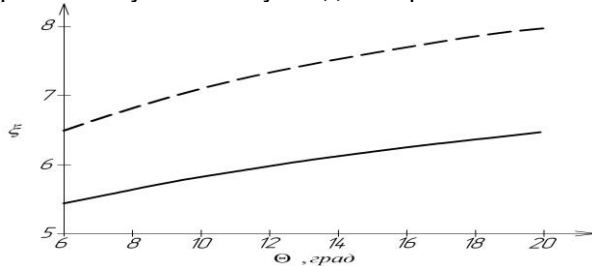


Рис. 4. Залежність $\xi(\Theta)$ (— — для $h_k = 0,2$ м; — — — для $h_k = 0,4$ м)

$$V_{vum} = a \cdot \omega \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \varepsilon}{2}\right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{4}{\pi} \cdot Z_k \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot \varepsilon}{2}\right)\right)^2} \quad (14)$$

де Z_k – параметр інтенсивності коливань; $\varepsilon = 0,834 \cdot \sqrt{S_h}$ – коефіцієнт; S_h – число Струхала [3].

Висновки. У статті розроблено математичну модель поведінки дрібнодисперсного СМ під дією вібрації у конічній лунці дозатора на основі системи Лоренца. Запропонована модель дозволяє дослідити вплив конструктивних параметрів випускної лунки на поведінку продукту у дозуючому обладнанні. Також використання даної моделі дає можливість передбачати рух продукту в залежності від обраного режиму вібрації. За допомогою системи Лоренца графічно представлені 3 можливі стани СМ: ущільнення, циркуляційні рухи, хаотичні рухи продукту.

Проектування вібраційного дозатора для дрібнодисперсного продукту на основі розробленої математичної моделі дозволяє підібрати оптимальні режими вібрації та геометрію лунки, що зможуть забезпечити наперед задані параметри технологічного процесу. Використання результатів досліджень дає можливість регулювати і прогнозувати рух матеріалу у лунці і тим самим підвищувати продуктивність та точність процесу вібраційного об'ємного дозування.

Список використаних джерел

1. Членов В.А. Виброкипящий слой / В.А. Членов, Н.В. Михайлов // М: Наука, 1972. – 343 с.
2. Пирожков Д.Н. Сведение гидродинамической модели виброоживленного сыпучего материала к системе Лоренца / Д.Н. Пирожков // Вестник Алтайского

Аналіз кривих (рис. 4) показує, що із зростанням кута нахилу стінок Θ розвантажувальної лунки дозатора збільшується інтенсивність вібрації $a\omega^2$, що необхідна для забезпечення безперервного та рівномірного витікання дрібнодисперсного СМ. Це пояснюється зростанням ущільнення матеріалу у зоні її випускного отвору.

Важливим показником ефективної роботи вібраційного дозатора є продуктивність Q , яка напряму залежить від швидкості витікання дрібнодисперсного СМ у зоні випускного отвору рівна:

государственного аграрного университета. Барнаул, 2008. – №8. – С. 59-65.

3. Шоловій Ю. П. Моделювання поведінки дрібнодисперсного сипкого матеріалу під дією вібрації у конічній лунці дозатора за допомогою системи Лоренца / Ю. П. Шоловій, Н. М. Тимошенко, Н. І. Магерус // Технологічні комплекси. – 2014. – №1. – С. 109-117.

4. Русанов С. А. Некоторые теоретические аспекты процесса виброкипания / С. А. Русанов, К. В. Луныка, В. А. Ардашев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №6/5. – С.23-25.

5. Магерус Н. І. Обґрунтування параметрів та режимів роботи вібраційних об'ємних дозаторів для дрібнодисперсних сипких матеріалів автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.02 «Машинознавство» / Н. І. Магерус // Львів: ПП «Ощипок М. М.», 1996. – 20 с.

Список джерел у транслітерації

1. Chlenov V.A., & Mikhailov N.V. (1972). *Vibrokipiashchii sloi [Vibro-boiling layer]*. Moscow: Nauka [in Russian].
2. Pirozhkov D.N. (2008). *Svidieniie gidrodinamichieskoi modeli vibroozhizhennogo sypuchego materiala k sistiemie Lorentsa [Reduction of the hydrodynamic model of a fluidized bulk material to the Lorentz system]*. *Viestnik Altaiskogo gosudarstviennogo agrarnogo univiersitieta, Barnaul - Bulletin of the Altai State Agrarian University, Barnaul*, 8, 59-65 [in Russian].
3. Sholovii Yu.P., Tymoshenko N.M. & Magerus N.I. (2014). *Modeliuvannia povedinky dribnodispersnogo sypkogo materialu pid diieiu*



vibratsii u konichnii luntsi dozatora za dopomohoiu systemy Lorentsa [Modeling the behavior of finely dispersed bulk material under the action of vibration in a conical duct hole using the Lorentz system]. *Tekhnologichni kompleksi - Technological complexes*, 1, 109 – 117 [in Ukrainian].

4. Rusanov S.A., Luniaka K. V. & Ardasev V.A. (2007). Niekotoryie tieorieticheskie aspekty protsessu vibrokypeniia [Some theoretical aspects of the process of vibrational boiling]. *Vostochno-Yevropeiskii zhurnal pieriedovyh tiehnologii – Eastern European Journal of Advanced Technology*, 6/5, 23 – 25 [in Ukrainian].

5. Magerus N.I. (2016). Obgruntuvannia parametriv ta rezhymiv roboty vibratsiinyh obiemnyh dozatoriv dlia dribnodispersnyh sykykh materialiv [Justification of parameters and operating modes of vibration dispensers for fine particulate materials]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Lviv: «Oshchypok M.M.» [in Ukrainian].

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ИСТЕЧЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ КОНИЧЕСКОЙ ВОРОНКИ ДОЗАТОРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВИБРАЦИИ

Рассмотрено моделирование процесса истечения мелкодисперсного сыпучего материала из конической разгрузочной воронки бункера при вибрационном возбуждении потока коническим днищем на основании модели Лоренца, которая позволяет описать поведение сыпучего продукта под действием вибрации. Поскольку мелкодисперсный СМ под влиянием

механических колебаний ведет себя аналогично жидкости, то самым эффективным способом получения модели Лоренца – это вывод из уравнений Навье-Стокса. Проанализирована динамика истечения СМ, влияние параметров воронки и режимов вибрации на эффективность процесса истечения.

Ключевые слова: разгрузочная воронка, сыпучий материал, истечение, вибрационное днище, параметры воронки, режимы колебаний.

ANALYSIS OF DYNAMICS OF CROSS-CUTTING OF DRY-DYE-BASED SUGAR MATERIAL FROM THE END OF THE VITAMINATION OF DIPERS

The simulation of the process of leakage of finely dispersed bulk material from the conical bunker of the hopper during vibrational perturbation of the flow by a conical bottom on the basis of the Lorentz model, which allows describing the behavior of the bulk product under the action of vibration, is considered. Since the fine-dispersive SM under the influence of mechanical vibrations behaves in a similar way to the liquid, the most effective way of obtaining the Lorentz model was to deduce it from the Navier-Stokes equations. The dynamics of leakage of SM, the influence of the parameters of the well and vibration modes on the efficiency of the leakage process have been analyzed.

Keywords: unloading well, loose material, vibrational bottom, leakage, parameters of the well, modes of oscillations.

Відомості про авторів

Шоловій Юрій Петрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Механіка та автоматизація машинобудування» Національного університету «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: J-sholov@ukr.net).

Магерус Надія Іванівна – кандидат технічних наук, асистент кафедри «Механіка та автоматизація машинобудування» Національного університету «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: maherusn@gmail.com).

Шоловий Юрий Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и автоматизация машиностроения» Национального университета «Львовская политехника» (ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, Украина, 79013, e-mail: J-sholov@ukr.net).

Магерус Надежда Ивановна – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Механика и автоматизация машиностроения» Национального университета «Львовская политехника» (ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, Украина, 79013, e-mail: maherusn@gmail.com).

Sholoviy Yuriy – PhD, Associate Professor of the Department of Mechanics and Automation of Mechanical Engineering of the Lviv Polytechnic National University (S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: J-sholov@ukr.net).

Magerus Nadiya – PhD, Assistant of the Department of Mechanics and Automation of Mechanical Engineering of the Lviv Polytechnic National University (S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: maherusn@gmail.com).