

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.047

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ СИПУЧОГО МАТЕРІАЛУ ПО РОБОЧОМУ
ОРГАНУ ВІБРАЦІЙНОГО ЖИВИЛЬНИКА З ДОВІЛЬНОЮ ФОРМОЮ
ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ**

Кононов Д.О., Ціколія А.З., Атаманчук Р. П.

*ННІ «Дніпровський металургійний інститут», Український державний
університет науки і технологій*

Анотація. *Виробництво сталі в конвертерних цехах пов'язане з витратою багатьох видів сипких матеріалів, включаючи значну кількість твердих розкислювачів.*

Використання вібраційних живильників з інерційним приводом ускладнено так як вони не забезпечують необхідну точність дозування, особливо у випадках, коли живильник працює у режимі частих пусків та зупинок.

Розроблено математичну модель багатошарового сипучого середовища з урахуванням форми поперечного перерізу лотка вібраційного живильника.

Приведені результати розв'язання системи диференціальних рівнянь. Рішення проводилося чисельно з використанням метода Рунге-Кутта IV-го порядку.

Побудовані відповідні графіки залежностей кінематичних параметрів від часу.

Розподіл швидкостей висотою поперечного перерізу носить складний характер і залежить від співвідношення різних параметрів. Спостерігаються режими, коли швидкості верхніх шарів більші за нижчі і навпаки.

Ключові слова: *сипкий матеріал, вібраційний живильник, багатошарова модель.*

Вступ. *Виробництво сталі в конвертерних цехах пов'язане з витратою багатьох видів сипких матеріалів, включаючи значну кількість твердих розкислювачів. Треба відмітити, що кількість цих компонентів постійно зростає [1, 2, 3].*

Широко застосовувані електровібраційні живильники відрізняються високою вартістю, складністю систем керування та налаштування. Простіші вібраційні живильники з інерційним приводом, але вони не забезпечують необхідну точність дозування, особливо у випадках, коли живильник працює у режимі частих пусків та зупинок.

Зазвичай вібраційний живильник (ВЖ) працює так:

За командою на завантаження ВЖ включається і подає матеріал або на конвеєр з ваговимірювачем або у ваговий бункер. Після набору необхідної дози сипучого матеріалу дається команда на зупинку.

Для забезпечення стійкої роботи живильника використовується зарезонансна настройка. Тобто власна частота коливань ВЖ у 3-4 рази менша за частоту збуджуючої сили.

У зв'язку з цим мають місце складності, що виникають при пуску та зупинці Вібрмашини: збільшення амплітуди коливань, миттєвої продуктивності. Це приводить к перевантаженню матеріала.

Для урахування цього перевантажування треба розробити модель вібраційного руху сипкого матеріалу. Існують багато моделей руху, але більшість з них побудовано на основі руху матеріальної точки та не враховує форму поперечного перерізу лотка ВЖ. Тому розробка математичної моделі руху сипучого матеріалу по робочому органу ВЖ з довільною формою поперечного перерізу є актуальною задачею [3, 4].

Основний матеріал. Розглянемо характер руху сипучого матеріалу по лотку вібраційного живильника з самобалансними вібраторами, нахиленому до горизонту на кут α , і представимо на ньому матеріал у вигляді багатошарової моделі, показаної на рис. 1.

Розіб'ємо весь матеріал площинами, паралельними верхній зовнішній поверхні матеріалу, що транспортується, на кілька шарів. Кожен шар характеризується дискретною масою, постійної у процесі вібротранспортування.

Як припущення розглядатимемо шар у вигляді твердого тіла постійного об'єму та форми.

Розглянемо сили, що діють на i -ий шар матеріалу:

$$\text{сила тяжіння } G_i = m_i \cdot g = \rho \cdot A_i \cdot L_i \cdot g,$$

де $m_i = \rho \cdot A_i \cdot L_i$ - маса i -ог шару матеріалу; A_i - площа поперечного перерізу; L_i - Довжина шару, приймається рівною довжині робочого органу живильника;

реакції взаємодії з нижче-і вищележачими шарами, N_i або N_{i-1} ;

для нижнього шару реакції взаємодії з робочим органом живильника, N_i ;
 сила тертя про вище- і нижчі шари, F_{mp_i} і $F_{mp_{i-1}}$;
 сила тертя об стіну робочого органу або його бічну поверхню (для живильників з нерухою бічною поверхнею) F_{Tp}^b ;
 сила обурення, що дорівнює переносній силі інерції, яку можна розкласти на дві складові: дотичну та нормальну до поверхні, що вібрує.

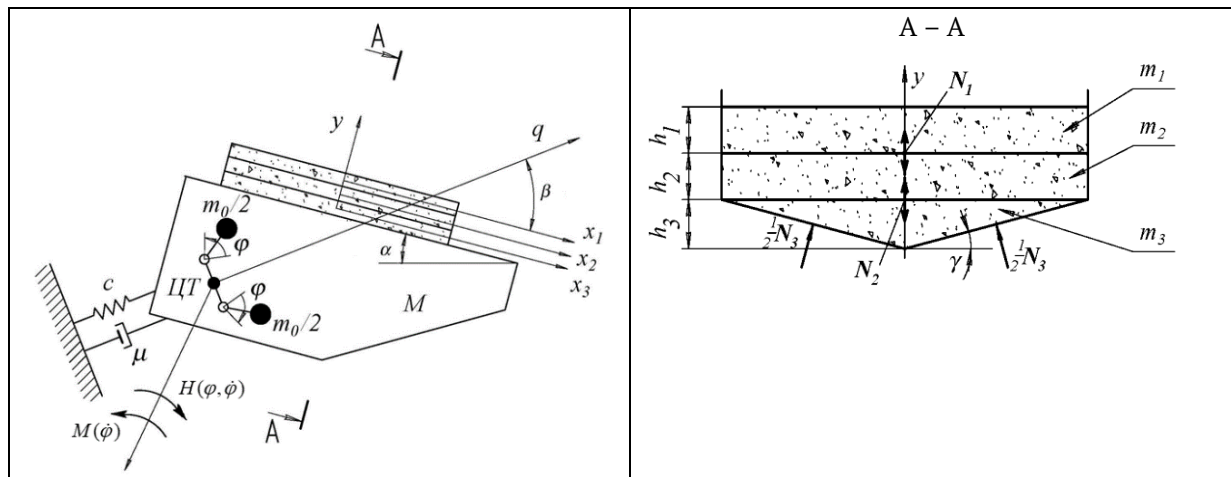


Рисунок 1 - Розрахункова схема вібраційного самобалансного живильника з багат шаровою моделлю сипучого матеріалу

На підставі вищевикладеного, можна записати таку систему диференціальних рівнянь для тришарової моделі:

$$\begin{cases}
 (M + \xi \cdot m)\ddot{q} + \mu\dot{q} + cq = m_0 r (\dot{\varphi})^2 \sin \varphi - m_0 r \ddot{\varphi} \cos \varphi; \\
 I\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + m_0 f_{np} r \frac{d}{2} \dot{\varphi}^2 = M(\varphi) - m_0 r \ddot{q} \cos \varphi; \\
 m_1 \ddot{y}_1 = -k_1^b m_1 \ddot{q} \sin \beta - m_1 g \cos \alpha + N_1; \\
 m_2 \ddot{y}_2 = -k_2^b m_2 \ddot{q} \sin \beta - m_2 g \cos \alpha + N_2 - N; \\
 m_3 \ddot{y}_3 = -k_3^b m_3 \ddot{q} \sin \beta - m_3 g \cos \alpha - N_2 + N_3 \cos \gamma; \\
 m_3 \ddot{y}_3 = -k_3^b m_3 \ddot{q} \sin \beta - m_3 g \cos \alpha - N_2 + N_3 \cos \gamma; \\
 m_1 \ddot{x}_1 = -k_1^c m_1 \ddot{q} \cos \beta + m_1 g \sin \alpha + F_{mp2} - F_{mp1}^b; \\
 m_2 \ddot{x}_2 = -k_2^c m_2 \ddot{q} \cos \beta + m_2 g \sin \alpha - F_{mp1} + F_{mp2} - F_{mp2}^b; \\
 m_3 \ddot{x}_3 = -k_3^c m_3 \ddot{q} \cos \beta + m_2 g \sin \alpha - F_{mp2} + F_{mp3} - F_{mp3}^b,
 \end{cases} \quad (1)$$

де m_i – маса i -го шару; $k_i^{e(z)}$ – коефіцієнт загасання для збурюючої сили; γ – кут, що утворюється днищем живильника та горизонталлю в поперечному перерізі живильника; q, \dot{q}, \ddot{q} – координата, швидкість прискорення живильника; $\phi, \dot{\phi}, \ddot{\phi}$ – кут повороту, кутова швидкість і прискорення валу дебалансу; \ddot{x}, \ddot{y} – відносне прискорення матеріалу; M – загальна маса коливальних частин; I – наведений момент інерції обертових частин приводу; m_0 – сумарна маса дебалансів; c – наведена жорсткість пружної системи у напрямку осі q ; r – радіус обертання центрів тяжкості дебалансів; $M(\dot{\phi})$ – момент на валу електродвигуна; μ – коефіцієнт в'язкого опору руху живильника, b – коефіцієнт в'язкого опору; $f_{пр}$ – наведений коефіцієнт тертя в підшипниках вібратора; d – діаметр цапфи підшипника; α – кут нахилу площини лотка до горизонту; β – кут між віссю q і площиною живильника (кут вібрації).

Система диференційованих рівнянь (2) є нелінійною, і з цієї причини рішення знаходитимемо чисельними методами з фіксованим кроком інтегрування.

Для обліку ударної взаємодії скористаємося коефіцієнтом відновлення при ударі k та визначимо швидкості після удару за відомими формулами.

При ударі об лоток

$$U = -kV \quad (2)$$

при ударі двох шарів, що рухаються

$$U_1 = \frac{m_1 V_1 + m_2 V_2 - m_2 k (V_1 - V_2)}{m_1 + m_2}; U_2 = \frac{m_1 V_1 + m_2 V_2 + m_1 k (V_1 - V_2)}{m_1 + m_2}, \quad (3)$$

де V_i, U_i – швидкості шарів до і після удару, відповідно; m_1, m_2 – маси шарів, що ударяються.

На рис.2 та 3 представлені результати розв'язання системи диференціальних рівнянь. Рішення проводилося чисельно з використанням метода Рунге-Кутта IV-го порядку з допомогою ЕОМ з такими основними вихідними даними: $M = 600$ кг; $m_0 = 25$ кг; $m_1 = m_2 = 75$ кг; $m_3 = 50$ кг; $I = 1,1$ кг · м

2 ; $\mu=2000 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}$; $z = 7105 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $r=0,05 \text{ м}$; $d = 0,06 \text{ м}$; $b = 0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $f = 0,01$; $P = 9,5 \text{ кВт}$; $n_n = 1460 \text{ хв}^{-1}$; $n_c = 1500 \text{ хв}^{-1}$.

Слід зазначити, що розподіл швидкостей висотою поперечного перерізу носить складний характер і залежить від співвідношення різних параметрів. Спостерігаються режими, коли швидкості верхніх шарів більші за нижчі і навпаки.

Наприклад, для високоінтенсивних режимів роботи швидкість переміщення верхніх шарів більше нижніх, теж саме спостерігається і при збільшенні кута нахилу лотка до горизонту. При зупинці живильника (за винятком малого проміжку часу) переміщення слів відбувається за рахунок ковзання по робочому органу та відносно один одного без відриву від лотка; тому при дослідженні процесу вибігу можна знехтувати підкиданням матеріалу. Отримані результати добре узгоджуються з експериментальними даними різних досліджень.

Висновок. Розроблено математичну модель багат шарового сипучого середовища з урахуванням форми поперечного перерізу лотка вібраційного живильника. Побудовані відповідні графіки залежностей кінематичних параметрів від часу.

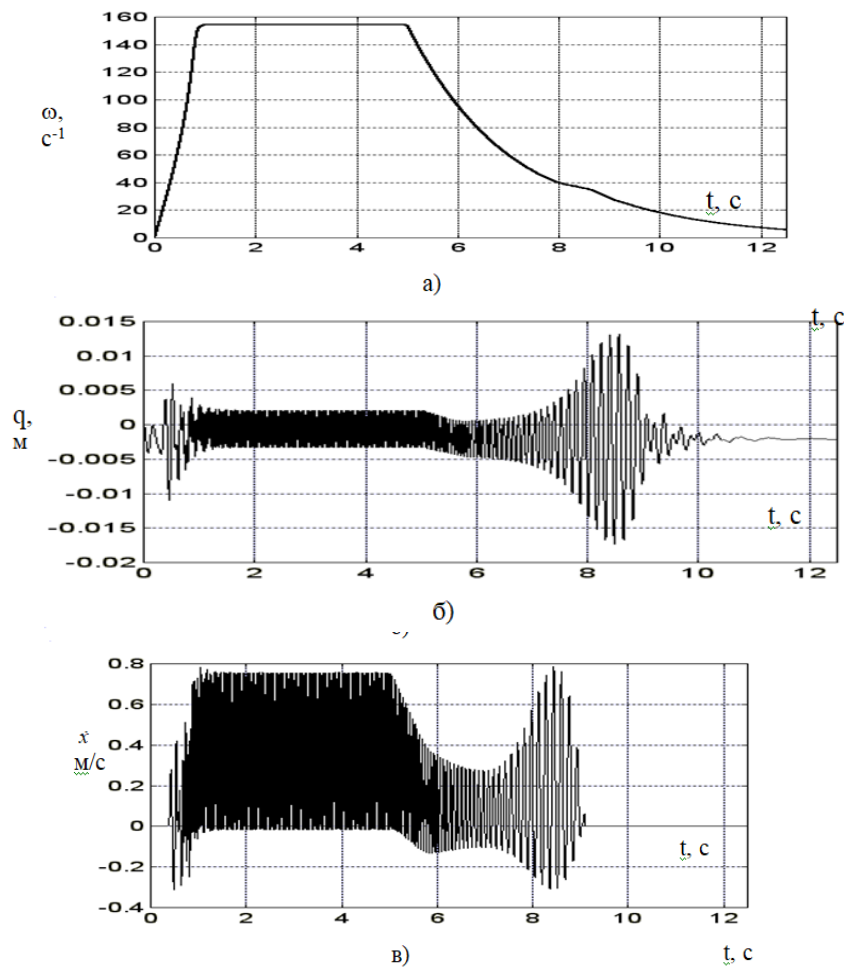


Рисунок 2 - Кінематичні параметри роботи вібраційного живильника: а) кутова швидкість двигуна; б) - переміщення живильника; в) - швидкість переміщення матеріалу

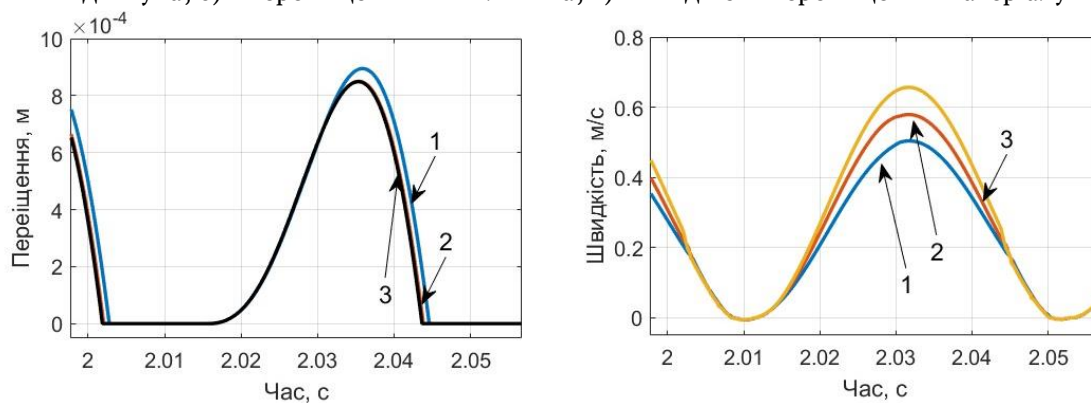


Рисунок 3 - Збільшені характеристики роботи вібраційного живильника з багатошаровою моделлю сипучого матеріалу (1-верхній шар, 2-нижній шар, 3-нижній шар): а) нормальне переміщення до віброуючої площини; б) швидкість переміщення матеріалу

ЛІТЕРАТУРА

1. Усачов В.П. Технологічні лінії та комплекси цехів. – У 2-ч. – Ч.2 – Технологічні основи компоновки ліній металургійних виробництв: Підручник для вузів. – К.: ІСДО, 1994.–416 с.

2. Вибрационная техника и технологии в энергоемких производствах : Моногр./ В. Н. Потураев, В. П. Франчук, В. П. Надутый; НАН Украины. Ин-т геотехн. механики. - Д., 2002. - 190 с.
3. Усачов В.П., Кононов Д.О. Проблеми раціонального використання вібраційної техніки в системах дозування сипких матеріалів// Підйомно-транспортна техніка.- Дніпропетровськ, 2002, №1-2.-с.135-139.
4. Кононов, Дмитро Олександрович. Підвищення точності дозування сипучих матеріалів шляхом удосконалення вібраційних живильників [Текст] : дис... канд. техн. наук: 05.05.08 / Кононов Дмитро Олександрович ; Національна металургійна академія України. - Д., 2004.

MATHEMATICAL MODEL OF THE MOVEMENT OF BULK MATERIAL ALONG THE WORKING BODY OF A VIBRATING FEEDER WITH AN ARBITRARY CROSS-SECTIONAL SHAPE

Kononov D.O., Tsikolia A.Z., Atamanchuk R. P.

Abstract. *Steel production in converter shops is associated with the consumption of many types of bulk materials, including a significant amount of solid deoxidizers.*

The use of vibrating feeders with an inertial drive is complicated because they do not provide the necessary accuracy of dosing, especially in cases where the feeder operates in the mode of frequent starts and stops.

A mathematical model of a multilayer bulk medium has been developed taking into account the shape of the cross-section of the vibrating feeder tray.

The results of solving the system of differential equations are presented. The solution was carried out numerically using the Runge-Kutta method of the 4th order.

The corresponding graphs of the dependences of kinematic parameters on time have been constructed.

The distribution of speeds along the height of the cross-section is complex and depends on the ratio of various parameters. Modes are observed when the speeds of the upper layers are greater than the lower ones and vice versa.

Keywords: *bulk material, vibrating feeder, multilayer model.*

REFERENCE

1. Usachov V.P. Technological lines and complexes of shops. – In 2 parts – Part 2 – Technological bases of arrangement of lines of metallurgical productions: Textbook for universities. – K.: ISDO, 1994.–416 p.
2. Vibration equipment and technologies in energy-intensive productions: Monograph. / V. N. Poturaev, V. P. Franchuk, V. P. Naduty; NAS of Ukraine. Institute of geotechnical mechanics. - D., 2002. - 190 p.

3. Usachov V.P., Kononov D.O. Problems of rational use of vibration equipment in dosing systems of loose materials// Lifting and conveying equipment.-Dnepropetrovsk, 2002, No. 1-2.-p.135-139. Smirnov V.O., Biletsky V.S. Preparatory processes of mineral enrichment. [textbook] – Donetsk: Eastern Publishing House, Donetsk branch of the National Technical School, 2012. – 286 p.
4. Kononov, Dmitry Aleksandrovich. Increasing the accuracy of dosing bulk materials by improving vibrating feeders [Text]: Dissertation... Candidate of Technical Sciences: 05.05.08 / Kononov Dmitry Aleksandrovich; National Metallurgical Academy of Ukraine. - D., 2004.