

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ, ІНФОРМАЦІЙНІ І ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

УДК 621.9.048.6

З. А. Стоцько, Д. П. Ребот, В. Г. Топільницький
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра проектування та експлуатації машин

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СЕПАРАЦІЇ

© Стоцько З. А., Ребот Д. П., Топільницький В. Г., 2018

Розглянуто вплив динамічних параметрів сипкого середовища на ефективність вібраційної сепарації за умови вертикального збурення корпусу вібраційного сепаратора. На основі моделювання сипкого середовища як нашарування плоских пружно-пластичних балок побудовано математичну модель руху середовища. Досліджено залежності амплітуди та частоти коливання сипкого середовища від його пружних характеристик. Проведені дослідження дають змогу надалі оптимізувати процес вібраційної сепарації з урахуванням найефективнішого амплітудно-частотного режиму.

Ключові слова: оптимізація, вібраційна сепарація, сипке середовище, пружні властивості, амплітудно-частотні характеристики.

It is investigated in the paper the influence of the dynamic parameters of the loose medium on the efficiency of vibration separation under the condition of vertical perturbation of the housing of the vibration separator. Based on the simulation of a loose medium as a layering of flat elastic-plastic beams, a mathematical model of the motion of the medium was constructed. The dependences of the amplitude and frequency of oscillations of the friable medium on its elastic characteristics are studied. The conducted researches allow furthering optimizing vibration separation process taking into account the most effective amplitude-frequency mode.

Key words: optimization, vibration separation, friable medium, elastic properties, amplitude-frequency characteristics.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток промисловості потребує постійного дослідження та вдосконалення виробничого обладнання. Це стосується як легкої, так і важкої та переробної промисловості. У всіх її галузях сепарація займає важливе місце на початкових та проміжних етапах переробки сировини. Тому актуальні дослідження, виконані для покращення конструкції сепараторів та оптимізації процесів сепарування. Доволі часто на виробництві використовують вібраційні сепаратори об'ємного типу. Їх застосування дає змогу зменшити робочу площу

виробництва, час сепарації та матеріальні затрати завдяки можливості нашарування більшої кількості сит та, відповідно, розділення багатокомпонентних сумішей за одну операцію.

До вібраційних сепараторів належать сепаратори із дебалансними віброзбуджувачами або моторами-вібраторами. Завдяки можливості незалежної зміни амплітуди коливань корпусу та інтенсивності вібрацій у таких сепараторах забезпечуються нестационарні режими оброблення сумішей, підвищення сили вібраційної дії на сипкі середовища, рівномірне їх розподілення по всій поверхні сита. За відсутності переходу сепаратора через проміжні резонанси під час запуску та зупинки дебалансного віброзбуджувача істотно підвищується надійність окремих вузлів та установки загалом. Важливою вимогою до сучасних вібраційних сепараторів є забезпечення мінімального обслуговування. Для цього як збурювальний елемент у них встановлюють мотор-вібратор (рис. 1).

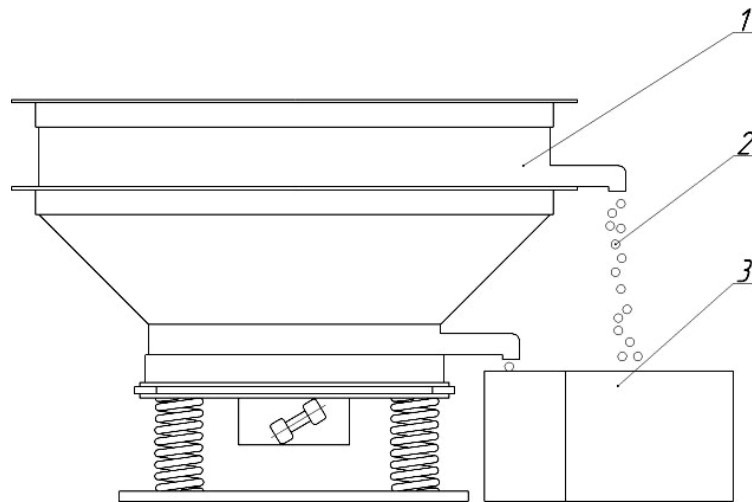


Рис. 1. Схема вібраційного сепаратора із вертикальним збуренням сит:
1 – корпус, 2 – сипке середовище; 3 – контейнер для розділених фракцій

Така конструкція зменшує габаритні розміри машини та спрощує її обслуговування через відсутність проміжних передавальних елементів, зокрема муфт, ланцюгів, пасів тощо. Також, завдяки плавній зміні кута нахилу та швидкості руху матеріалу по ситі вібросепаратора досягається ефективніший поділ частинок на фракції під час вібросепарації. Гнучкість налаштувань сприяє можливості сепарації ширшого асортименту сировини. У разі розташування мотор-вібратора та пружин під корпусом у сепараторі виникають вертикальні збурення сит, сипке середовище у цьому випадку здійснює поперечні коливання.

На якість та час сепарації впливають не тільки конструктивні характеристики сепаратора, але й характеристики самого середовища, зокрема склад та форма сипкого матеріалу, вологість, товщина шару на ситі. Тобто всі ці показники під час сепарації визначають взаємовплив частинок та шарів середовища, який може змінювати їх амплітуду коливань. Ці питання малодосліджені та потребують подальшого вивчення.

Аналіз попередніх досліджень. У [1–4] визначено, що ефективність роботи вібросепараторів залежить не тільки від їхніх динамічних та конструкційних параметрів, але й від властивостей сипких середовищ, які сепаруються. Встановлено [5], що під час вібросепарації масових вантажів на процес руху істотно впливають не тільки характер дії сепарувального органа, але й особливості взаємодії складових шарів та частинок одна з одною. Основним

недоліком у роботі сепараторів з нерухою робочою поверхнею є розсіювання дальності відскоку в середовищі, яке сепарується. Причина – неправильна форма грудок матеріалу, що призводить до косоного удару, при цьому центр ваги частинки зміщується від вертикалі в місці дотику частинки і сита. У результаті дальність польоту частинки меншає. Велика дисперсія дальності відскоку частинок дає змогу застосовувати цей метод тільки для компонентів зі значними відмінностями у міцності. Ефективнішою є сепарація за пружністю для мінералів з округлою формою частинок, наприклад, для гравію.

Під час сепарації насипного середовища шар, що контактує із поверхнею робочого органу, отримує від нього силові імпульси. Від нижнього шару імпульси передаються до шарів, розміщених вище. Внаслідок наявності сил тертя та необхідних деформацій імпульси у міру передавання їх від шару до шару поступово послаблюються, причому ступінь їх загасання визначається властивостями сипкого середовища, яке сепарується, а також характером та величиною силових імпульсів, що створюються робочим органом. Енергія коливного руху робочого органу витрачається на прискорення середовища, що сепарується, та відновлення втрат у разі незворотних деформацій.

У режимі з підкиданням нижній шар передає всю свою кінетичну енергію розташованим вище шарам та починає зворотний рух, хоча верхні шари продовжують рухатись догори. В цей момент починається розрихлення шару середовища, що сепарується, коли верхні шари ще в підвішеному стані, а нижній шар, впавши на поверхню, частково проходить крізь отвори, а частково отримує імпульс і знову спрямовується догори. Верхні та нижні шари стикаються в підвішеному стані, переміщаючись один назустріч одному. Верхній шар, одержавши від нижнього імпульс, спрямований вгору та вперед, продовжує рухатись, а нижній, витративши кінетичну енергію, знову повертається на робочу поверхню. При цьому відбувається ущільнення, за якого дрібніші фракції верхніх шарів проникають в нижні шари і під час руху просіюються через отвори в робочому середовищі. Це пояснюється тим, що під час передавання руху в напрямку транспортування сипкого середовища по робочій поверхні відбувається взаємне просковзування складових частинок. Найбільше на цей процес впливають висота шару сипкого середовища, його пружні властивості, а також частота, амплітуда та швидкість руху середовища вздовж сита. В попередніх дослідженнях [5] визначено, що існує взаємозв'язок між пружними характеристиками сипкого середовища, його амплітудою та частотою коливання.

Формування мети досліджень. Мета дослідження – підвищити ефективність процесу вібраційної сепарації сипких середовищ за рахунок визначення впливу параметра нелінійності та динамічного модуля пружності сипкого середовища на його амплітуду коливань.

Виклад основного матеріалу. Оскільки корпус вібросепаратора здійснює складний просторовий рух, рівняння, які описують вплив динамічних параметрів сипкого середовища на ефективність сепарації, матимуть доволі складну структуру. Тому доцільно розглядати окремі випадки руху сит вібросепаратора. Розглянемо модель вібраційного сепаратора із вертикальним збуренням сит (рис. 1). Розглядаючи сипке середовище як нашарування плоских пружно-пластичних балок, які контактують зі стінками контейнера пружно або як шарнірно закріплені, з урахуванням методів КБМ [7–10] отримаємо диференціальне рівняння поперечних коливань сипкого середовища:

$$m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} V^2 + 2 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + V \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^{\nu+1} \right) + S \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \varepsilon q(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial u}{\partial x}, \dots, \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}), \quad (1)$$

де V – швидкість руху сипкого середовища вздовж сита; m – маса умовно виділеної одиниці сипкого середовища; E – жорсткість сипкого середовища; S – пружна сила; ν – коефіцієнт, що враховує пружні нелінійні характеристики сипкого середовища.

Вважатимемо, що сипке середовище рухається вздовж сита із певною сталою швидкістю, яка регулюється за рахунок зміни кута нахилу сита до горизонту. Тоді повні похідні за часом у змінних Ейлера матимуть вигляд:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial x} V + \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} V^2 + 2V \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Із їх урахуванням диференціальне рівняння руху поперечних коливань сипкого середовища описується рівнянням:

$$m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} V^2 + 2 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + V \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^{\nu+1} \right) + S \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \varepsilon q(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial u}{\partial x}, \dots, \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}). \quad (3)$$

Крайові умови матимуть вигляд:

$$u(x, t)|_{x=j} = 0, \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}|_{x=j} = 0, \quad j = 0, l. \quad (4)$$

У попередніх дослідженнях [6] знайдено співвідношення, що визначає параметр ν , та встановлено, що він є завжди непарним числом:

$$\nu = 2 / \log_{\delta} (a_1 / a_2) = 2 \log_{\frac{a_1}{a_2}} \delta \quad (5)$$

Динамічний модуль пружності:

$$E = \left(\frac{\Pi_T \mu_1}{\pi} \right)^2 \frac{m}{(\nu + 1) I a^{\nu}} \left(\frac{l}{k} \right)^{\nu+2} \quad (6)$$

У разі наближення частоти зовнішнього збурення до частоти коливання сипкого середовища в останньому виникатиме резонанс. Відомо, що резонанс у сипкому середовищі сприяє ефективнішому його розрихленню, що підвищує швидкість та якість сепарації, тому розглянемо резонансний випадок руху сипкого середовища в контейнері вібраційного сепаратора, де $2\pi / \mu(\tau_s) \approx 2\Pi_T / \omega(a_s)$ – час зовнішнього періодичного збурення за настання резонансу.

Для визначення впливу параметра, що враховує пружні властивості середовища та його динамічного модуля пружності на ефективність сепарування, в кінцевому варіанті отримаємо такі залежності:

$$\frac{da}{dt} = \frac{\varepsilon}{2\Pi_T \omega P} \times \int_0^l \int_0^{2\Pi_T} sa \left(\frac{2}{\nu+1}, 1, \frac{\Pi_x}{l} x \right) \bar{f}_1 \left(asa \left(\frac{2}{\nu+1}, 1, \frac{\Pi_x}{l} x \right) ca(\nu+1, 1, \psi), \dots, 0 \right) sa(1, \nu+1, \psi) d\psi dx,$$

$$\frac{d\psi_k}{dt} = \omega - \mu + \alpha \left[2^{\nu+1} a^\nu \frac{\nu+1}{(\nu+2)^{\nu+1}} \left(\frac{\Pi_x}{l} \right)^{2\nu+1} \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{\varepsilon(\nu+1)}{4\Pi_T a \omega P} \times$$

$$\times \int_0^l \int_0^{2\Pi_T} sa \left(\frac{2}{\nu+1}, 1, \frac{\Pi_x}{l} x \right) \bar{f}_1 \left(asa \left(\frac{2}{\nu+1}, 1, \frac{\Pi_x}{l} x \right) ca(\nu+1, 1, \psi), \dots, 0 \right) ca(\nu+1, 1, \psi) d\psi dx, \quad (7)$$

Цілком зрозуміло, що різні пружні характеристики по-різному впливають на процес вібраційної сепарації та можуть як понижувати, так і підвищувати його ефективність. З урахуванням широкого спектра продукції, яка підлягає сепарації (від скляних, пластмасових або металевих кульок аж до середовищ із агломератів чи композиційних матеріалів під час їх збагачення). Загалом для багатьох матеріалів саме співвідношення, що описують пружні інтегральні властивості, доволі виражено нелінійні.

На рис. 2 подано графіки залежності амплітуди коливань від частоти коливань сипкого середовища та параметра, що враховує пружні властивості сипкого середовища.

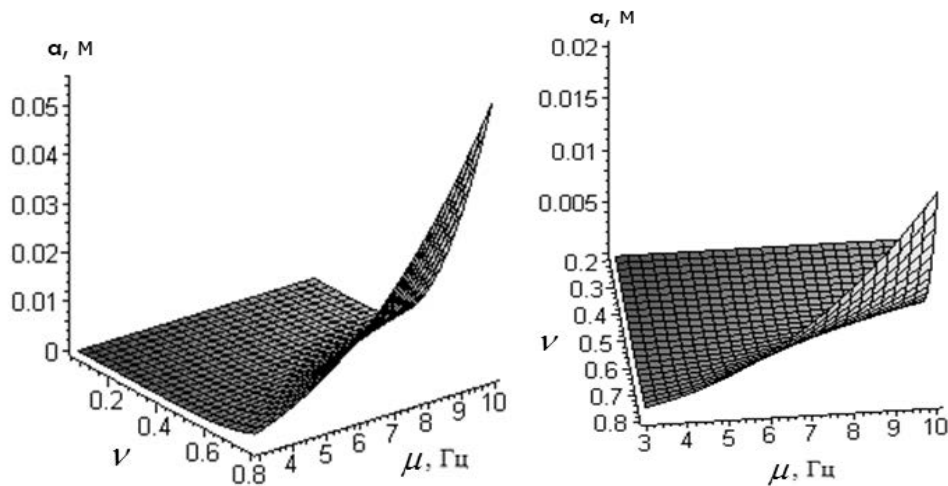


Рис. 2. Вплив параметра ν та частоти коливання сипкого середовища на його резонансну амплітуду коливань: а – $\alpha = 20, l = 1,7\text{ м}, k = 1$; б – $\alpha = 20, l = 1,2\text{ м}, k = 1$

Висновки. Побудована математична модель дає змогу визначити вплив пружних характеристик сипкого середовища на резонансну амплітуду та частоту сипкого середовища. Із побудованих графічних залежностей випливає, що за умови малих пружних властивостей середовища амплітуда коливань зростає, а частота зменшується, а у випадку великих – зростає і амплітуда і частота коливань. Це вказує на те, що для жорстких середовищ процес сепарації інтенсивніший за більших значень амплітуди коливань сипкого середовища. Для м'яких середовищ для оптимізації процесу необхідно враховувати як амплітуду, так і частоту їх коливань. Ці дослідження надалі можуть бути основою для вибору ефективних режимів сепарації для різних типів сипких середовищ.

1. Stotsko Z. A., Topilnytskyu V. G., Kysyj J. M. (2013). *Matematychna model opysu dynamiku vibraciynogo separatora z debalansnym pryvodom. Avtomatyzaciya vyrobnychyh procesiv v machynobydyvanni ta prykladobydyvanni*, 47, 28–36. 2. Topilnytskyu V. G., Stotsko Z. A., Kysyj J. M., Rebot D. P. (2014). *Investigation of the dynamics of vibratory separator with unbalanced drive. Visnyk*

Natsional'nogo universytetu "L'vivska politekhika". Optyimizaciya vyrobnychkykh procesiv I tekhnichnyy kontrol' v mashynobydyvanni ta prylobobuduvanni, 786, 53–61. 3. Stotsko Z. A., Sokil B. I., Topilnytsky V. G., Rebot D. P. (2014). Dynamika sypkogo seredovyscha u vibroseparatori z vertycalnym kolyvanniam syt.. Visnyk Natsional'nogo universytetu "L'vivska politekhika". Dynamika, micnist' ta proektyvannya mashyn ta prykladiv, 788, 60–65. 4. Stotsko Z. A., Rebot D. P., Topilnytsky V. G. (2016). Modeling and optimization of the parameters of loose environment vibratory separation. Scientific journal Technological Complexes, 13, 86–90. 5. Topilnytsky V. G., Rebot D. P., and others. Modeling the dynamics of vibratory separator of the drum type with concentric arrangements of sieves. Eastern-european journal of enterprise technologies, 2/7 (86), 26–35. 6. Rebot D. P., Topilnytsky V. G., Matematychna model' vyznachennya zminy amplitudy ta chastoty kolyvann' sypkogo materialy v procesi vibroseparacii. Naukovyy visnyk Nacional'nogo lisotekhnichnogo universytety, 28.2, 164–166. 7. Bogolubov N. N., Mitropolsky Y. A. (1961). Asymptotic methods in the theory of Nonlinear Oscillations. New Delhi: Hindustan Publishing Company, 537. 8. Mitropolsky Y. A., (1997) Nelineynaya mekhanika. Odnoshastotnye koljebaniya. Kyiv, Ins. matematiki NAN Ukrainy, 385. 9. Blekhmann, I. I. Sinkhronizaciya dinamicheskikh system [Text] / I. I. Blekhmann. – Moscow: Mashynostroenie, 1971. – 896 p. 10. Subach, A. P. Dynamica processov i mashyn obyemnoy obrobky [Text] / A. P. Subach. – Riga: Zinatne, 1991. – 240 p.