

З.А. Стоцько, Б.І. Сокіл, Д.П. Ребот, В.Г. Топільницький
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронного машинобудування

ДИНАМІКА СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА У ВІБРОСЕПАРАТОРІ З ВЕРТИКАЛЬНИМ ПРИВОДОМ СИТ

© Стоцько З.А., Сокіл Б.І., Ребот Д.П., Топільницький В.Г., 2014

Розглянуто динаміку сипкого середовища у вібраційному сепараторі з вертикальним приводом сит. Побудовано рівняння, що описують поперечні коливання сипкого середовища у вібраційному сепараторі. Запропоновано метод визначення впливу зовнішніх чинників на частоту коливання сипкого середовища та побудовано графічні залежності, що описують вплив на частоту коливань сипкого середовища деяких його властивостей та сил збурення.

In the article the dynamics of loose environment is investigated in vibrating separator with screen's vertical oscillations. There are constructed the equations which describe the transversal vibrations of loose environments in vibrating separator. The method for determining the impact of external factors on the frequency of loose environment oscillation is proposed and graphical dependencies which describe the dependence of the oscillation frequency on the loose medium's stiffness and strength are built.

Актуальність дослідження. Вібраційна сепарація широко застосовується в народному господарстві, зокрема в гірництві та добуванні корисних копалин, в сільському господарстві, медицині, харчовій промисловості. Такий тип сепарації характеризується недорогим технічним обслуговуванням відповідного обладнання, доступними комплектуючими та легким їх монтажем. Вібраційній сепарації притаманна змінна швидкість сепарації, можливість сепарування різного типу продуктів та більша, порівняно з іншими видами сепараторів, продуктивність. Із розвитком промисловості відбувається вдосконалення вібраційних сепараторів. Великого поширення набувають вібросепаратори об'ємного типу, що зумовлено (завдяки їх будові) можливістю досягнення економії робочої площі у виробництві, часу сепарації та матеріальних витрат.

Вібраційні сепаратори, порівняно з іншими сортувальними пристроями, забезпечують вищу продуктивність та чіткість розділення з меншими витратами електроенергії, завдяки тому, що під час вібрування шар продукту на ситі інтенсивно розрихлюється, зменшується тертя між частинками, вони стають рухомішими, що зумовлює відносний перерозподіл за їх величиною та прискорює виділення прохідних частинок.

Встановлення ексцентричного приводу у вібраційних сепараторах дає можливість не тільки підсилити вібрувальну дію на сипке середовище, але й скорегувати її для певного виду середовища, що сепарується. За рахунок регулювання амплітуди, частоти та кута нахилу сита до горизонту досягається більша ефективність роботи сепаратора та триваліший термін його служби. У виробництві застосовуються вібраційні сепаратори з горизонтальним та вертикальним приводом сит. Останні знаходять все ширше застосування у промисловості, їх виготовляють такі фірми, як SWECO [1] (рис. 1, 2), Xinxiang Dayong Vibration Equipment Co., Shanghai Zenith Mining And Construction Machinery Co., WS Tyler.



Рис. 1. Вібраційний сепаратор для розділення сипких середовищ фірми SWECO

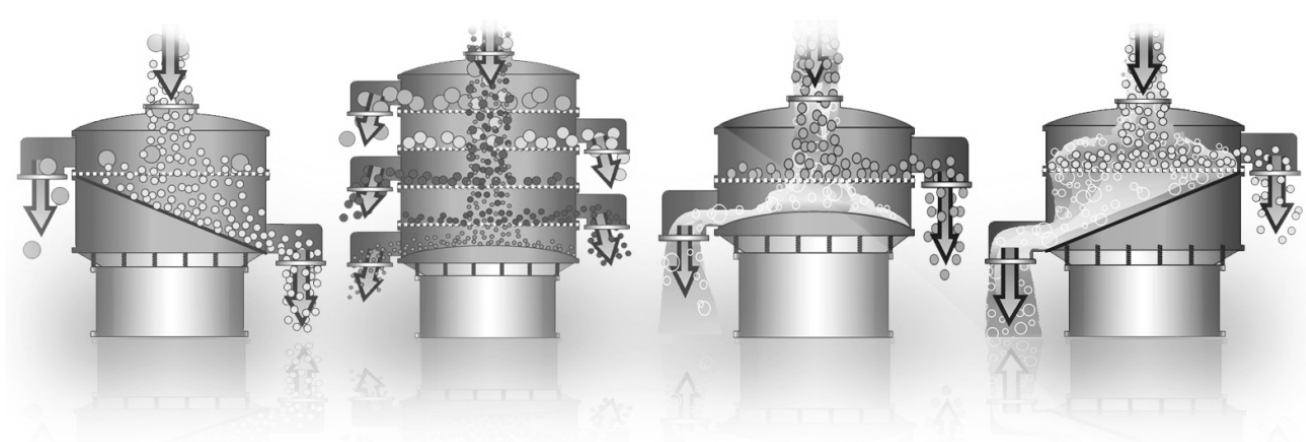


Рис. 2. Типи розташування сит та способів сепарації сипких середовищ вібросепараторами фірми SWECO

Аналіз попередніх досліджень. Встановлено [2, 3], що продуктивність та ефективність роботи вібросепаратора залежать не тільки від динамічних та кінематичних параметрів вібраційного сепаратора, але і від властивостей середовища, що сепарується. Ефективність просіювання характеризується коефіцієнтом корисної дії сит, тобто відношенням маси зерен, що прийшли крізь сито, до маси зерен такого самого розміру, що містяться у вихідній суміші. На якісний аспект цього процесу впливає товщина шару сипкого матеріалу, що переміщається по ситу, форма і величина отворів та частинок, швидкість переміщення матеріалу та його вологість. Також на ефективність сепарації впливають такі характеристики середовища, як маса, густина, коефіцієнти тертя, пружності тощо. Зокрема, проведеними дослідженнями встановлено, що різні типи сипкого середовища потребують різних амплітудно-частотних характеристик вібросепаратора для максимально ефективного процесу сепарації [2].

Як відомо, вібраційний сепаратор у процесі сепарації сипкого середовища здійснює складний зворотно-поступальний рух у горизонтальній та вертикальній площинах. Відповідно такий самий рух надається середовищу, що сепарується. Щоб полегшити задачу розгляду динамічного процесу руху сипкого середовища у вібросепараторі, пропонується розглянути окремі випадки його руху, а саме – зворотно-поступальний горизонтальний рух та зворотно-поступальний вертикальний рух. Перший випадок руху детально описано в попередніх дослідженнях [2, 4], тому доцільно детальніше зупинитись на розгляді саме другого випадку. При цьому сипке середовище моделюється як нашарування плоских пружно-пластичних балок.

Розглянемо детальніше основні фізичні закономірності процесу руху сипкого середовища під час вібросепарації. Важливо, що характеристики цього руху залежать від гранулометричного складу сипкого середовища. Найбільші якісні відмінності в характері руху сипкого середовища спостерігаються під час сепарації доволі дрібних та великих частинок. Процес переміщення дрібних середовищ формується більшою мірою під впливом аеродинамічних факторів, пов'язаних з поганою повітропрохідністю шару, характер переміщення великих частинок залежить від особливостей їх взаємодії з робочим органом.

Встановлено, що під час вібросепарації масових вантажів на процес руху істотно впливає не тільки характер дії сепарувального органа, але й особливості взаємодії складових моношарів та частинок одна з одною. Під час сепарації насипного середовища моношар, що входить у контакт з поверхнею робочого органа, отримує від нього силові імпульси. Від нижнього моношару імпульси передаються моношарам, розміщеним вище. Внаслідок наявності сил тертя та необхідних деформацій імпульси в процесі передачі їх від моношару до моношару поступово послаблюються, причому ступінь їх загасання визначається властивостями сипкого середовища, що сепарується, а також характером та величиною силових імпульсів, що створює робочий орган. Енергія коливного руху робочого органа витрачається на прискорення середовища, що сепарується, та відновлення втрат у разі незворотних деформацій.

У режимі з підкиданням нижній моношар середовища передає свою кінетичну енергію верхнім шарам та починає зворотний рух, хоча верхні моношари продовжують рухатись догори. У цей момент починається розрихлення шару середовища, що сепарується, коли верхні моношари все ще в підвішеному стані, а нижній шар, впавши на поверхню, частково проходить крізь отвори, а частково отримує імпульс і знову спрямовується догори. При цьому верхні та нижні моношари зустрічаються в підвішеному стані, переміщаючись один назустріч одному. Верхній моношар, отримавши від нижнього імпульс, напрямлений вгору та вперед, продовжує свій рух, а нижній, витративши кінетичну енергію, знову повертається на робочу поверхню. При цьому відбувається ущільнення, за якого дрібніші фракції верхніх моношарів проходять в нижні моношари і під час руху просіюються через отвори в робочому середовищі. Це пояснюється тим, що під час передачі руху в напрямку руху сипкого середовища по робочій поверхні відбувається взаємне перемішування складових частинок. В основному впливають на цей процес властивості сипкого середовища, а також частота, амплітуда та напрямок руху, наданого йому.

Стохастичний характер зміни властивостей масивних частинок середовища вагомо змінює характер їх руху порівняно з рухом дрібних частинок, що зазнають дії значних аеродинамічних опорів. Навіть за дуже інтенсивних коливань робочого органа час вільного руху дрібних частинок не перевищує одного періоду коливання сепарувального органа. Це пояснюється тим, що разом з розглянутими силами під час вібросепарації дрібних частинок з поганою повітропрохідністю шару на характер руху сильно впливають аеродинамічні сили. Ці сили виникають внаслідок того, що в проміжках між поверхнею сепарувального органа та нижнім моношаром середовища, що сепарується, під час підкидання виникає розрідження, а під час падіння – підвищення тиску щодо атмосферного.

Істотно впливає на процес вібросепарації вологість середовищ, що мають схильність до налипання, оскільки у середовищах, що налипають, сухе тертя об поверхню сепарувального органа змінюється на в'язке. При цьому величина зчеплення з сепаруючим органом мало або зовсім не залежить від ступеня притискання їх до поверхні сепарування. В цьому випадку є характерним зчеплення сипкого середовища з бічними стінками сепарувального органа, що утворює відкоси, на яких затримується частина середовища, що сепарується, внаслідок чого зменшується ефективність роботи сепаратора.

Побудова математичної моделі. З урахуванням вищевказаного важливо дослідити залежність частоти коливання сипкого середовища від його швидкості, жорсткості та сили, що діє на шар середовища.

Основою для знаходження диференціального рівняння, яке описує поперечні коливання сипкого середовища, слугує фізична модель останнього, за якою середовище рухається вздовж сита зі сталою швидкістю V , здійснюючи поперечні коливання відносно нього. Також вважатимемо, що площа поперечного перерізу, погонна маса, момент інерції є повільно змінними вздовж сита параметрами.

За умови, що сито вібраційного сепаратора здійснює вертикальні коливання, рівняння руху сипкого середовища матиме вигляд:

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

де E – жорсткість сипкого середовища; I – момент інерції його поперечного перерізу відносно осі, яка проходить через центр його перерізу.

Крайові умови в цій задачі матимуть вигляд:

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

тобто вважатимемо, що матеріал, який сепарується, контактує зі стінками контейнера пружно або як шарнірно закріплена балка. У виразах (1), (2) m – погонна маса шару середовища, l – довжина шару середовища.

Оскільки права частина рівняння (1), яке описує динаміку досліджуваного об'єкта, пропорційна до малого параметра e , для побудови його розв'язку можна використати загальні ідеї асимптотичних методів нелінійної механіки [5]. Однак пряме їх застосування пов'язане зі значними математичними труднощами – відсутністю точних розв'язків диференціальних рівнянь, які відповідають незбуреному процесу. Наявність у них мішаної похідної за лінійною і часовою змінними унеможлиблює, навіть у разі лінійних аналогів таких систем [6], застосування відомих класичних методів інтегрування рівнянь з частинними похідними (Фур'є чи Д'Аламбера). Тому нижче розвинено методику наближеного аналітичного дослідження динамічного процесу поперечних коливань сипкого середовища, в основу котрого покладено основні ідеї методів Бубнова–Гальоркіна [7] та Ван-дер-Поля [8].

Відповідно до основної ідеї методу Бубнова–Гальоркіна, розв'язок рівняння (1) для $n = 0$, який задовольняє крайові умови (2), можна подати у вигляді:

$$u(x, t) = \sum_{k=1}^s X_k(x) T_k(t), \quad (3)$$

де $\{X_k(x)\}$ – повна система функцій, яка задовольняє крайові умови (2), тобто $X_k(0) = X_k(l) = 0$ та $X_k''(0) = X_k''(l) = 0$. Такою найпростішою системою функцій буде $\{X_k(x)\} = \left\{ \sin \frac{kP}{l} x \right\}$. Тоді, щоб знайти невідомі функції $T_k(t)$ із (3), здійснивши деякі перетворення, отримуємо звичайні диференціальні рівняння:

$$\frac{d^2 T_k(t)}{dt^2} + \left(\frac{kP}{l} \right)^2 \left(\frac{\left(\frac{kP}{l} \right)^2 EI - S_0}{m} - V^2 \right) T_k(t) = eF \left(t, T_k, \frac{dT_k}{dt} \right), \quad (4)$$

де

$$F \left(t, T_k, \frac{dT_k}{dt} \right) = \frac{1}{P_0} \int_0^l q(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial u}{\partial x}, \dots, \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}) \sin \frac{kP}{l} x dx, \quad P_0 = \int_0^l \sin^2 \frac{kP}{l} x dx = l.$$

Розв'язок відповідного незбуреного аналога отриманого рівняння:

$$T(t) = a \cos(\omega t + q), \quad (5)$$

де a, ω, q – відповідно амплітуда, власна частота, початкова фаза матеріалу, що сепарується, причому власна частота визначається залежністю:

$$\omega = \frac{kp}{l} \sqrt{\frac{\left(\frac{kp}{l}\right)^2 EI - S}{m} - V^2}. \quad (6)$$

Тут і нижче індекс k , який вказує на форму “динамічної рівноваги”, не враховується.

На рис. 3 подано, за різних значень швидкості руху сипкого середовища вздовж сита, залежності частоти власних коливань його від жорсткості та сили збурення.

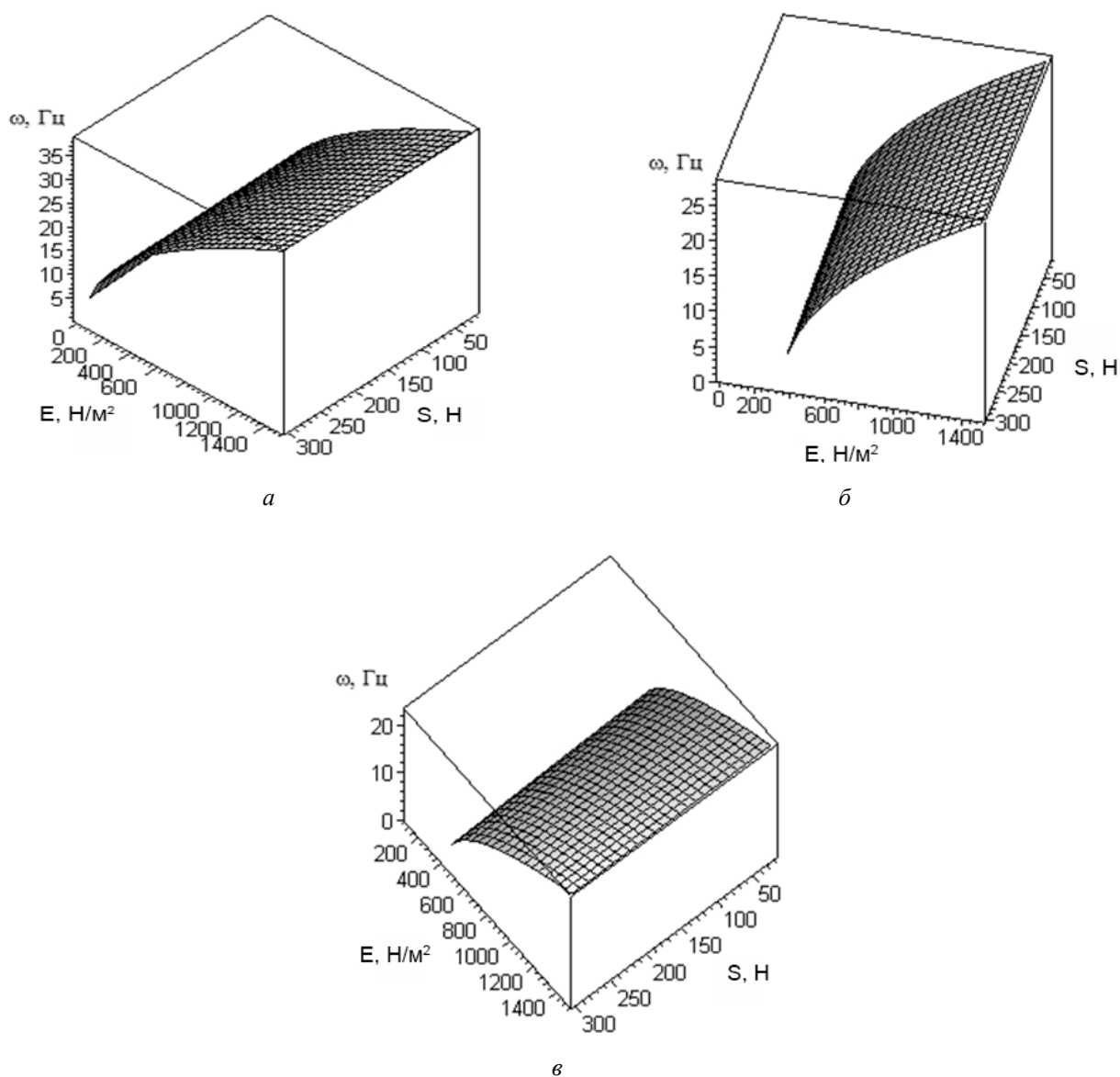


Рис. 3. Залежність частоти коливання сипкого середовища від жорсткості та сили, що діє на нього: а – $V = 0$ см/с, $l = 1,2$ м, $m = 100$ кг; б – $V = 5$ см/с, $l = 1,2$ м, $m = 100$ кг; в – $V = 5$ см/с, $l = 1,6$ м, $m = 100$ кг

Наведені графічні залежності показують, що:

- а) для більших значень жорсткості сипкого середовища власна частота його коливань є більшою;
- б) зі зростанням швидкості руху середовища вздовж сита частота власних коливань зменшується.

Висновки. Одержана математична модель дає змогу скорегувати частоту коливання сипкого середовища для максимально ефективного процесу сепарації. Залежно від типу сипкого середовища, його пружних властивостей, сил, що діють між частинками та робочою поверхнею, можна вибрати оптимальну частоту сепарації сипкого середовища, яка дозволить досягти максимально ефективного процесу його сепарування. Також отримані вище результати є базою для дослідження впливу на динаміку сипкого середовища зовнішніх чинників (періодичного збурення) та нелінійних зовнішніх і внутрішніх сил.

1. Сепаратори фірми SWECO [Електронний ресурс]: [Сайт] – Режим доступу: http://www.sweco.com/separators_sifters_screeners.html (дата звернення 15. 02. 2014). – Назва з екрана. 2. Ребот Д.П. Формування динамічних параметрів та підвищення ефективності вібросепараторів сипких середовищ: автореф. дис...канд. техн. наук. – Львів. – 2013. – 19 с. 3. Гончаревич И.Ф. Вибрационные машины в строительстве / И.Ф. Гончаревич, П.А. Сергеев. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 312 с. 4. Топільницький В.Г. Динамічні процеси у вібромашинах для об'ємної обробки з дебалансним вібробудником: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Львів, 2002. – 16 с. 5. Боголюбов Н.И., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. – М., 1974. 6. Митропольский Ю.А., Моисеенков Б.И Асимптотические решения уравнений в частных производных. – К., 1976. 7. Бабаков. И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков. – М.: Наука, 1965. –560 с. 8. Wan der Pol. A Teory of the Amplitude of Free and Forced Triode Vibrations // Radio Review. –1920. – № 1.