

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

ВПЛИВ ЗМІНИ АМПЛІТУДО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПРОЦЕС ВІБРАЦІЙНОЇ СЕПАРАЦІЇ

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

В статті побудовано математичну модель руху сипкого середовища вздовж сита вібраційного сепаратора, за умови, що швидкість руху частинок вздовж сита є сталою, а їх фізико-механічні характеристики змінні. Досліджено вплив кінематичного збурення та швидкості руху сипкого середовища вздовж сита вібраційного сепаратора на інтенсивність процесу вібраційної сепарації.

The mathematical model of loose environment's motion along a sieve of the vibrating separator is built in the article. In this case the rate of loose environment is constant, and physical - mechanical properties are variable. The influence of kinematic perturbation and speed of loose environment along a sieve of vibrating separator on the separation process intensity is investigated.

Актуальність дослідження. На сьогодні вібросепаратори широко застосовується в різних галузях промисловості та сільському господарстві. Це зумовлено в першу чергу конструктивною простотою вібраційних сепараторів, а також, в багатьох випадках, більш високою ніж у звичайних машинах, технологічною ефективністю. До їх позитивних сторін відносяться: суттєва перевага у прохідній властивості, просіювання на сітках з широким діапазоном розміру лунок, ефект самоочищення сітки при роботі з матеріалами, тривалий термін служби сита та простота його заміни.

Загалом вібраційні сепаратори по принциповій динамічній будові та конструктивній схемі в основному подібні до вібраційних живильників та конвеєрів. Основна їх відмінність полягає в конструкції робочого органу, так як у вібраційних сепараторах застосовуються корпуси з ситами, колосниками, ситами, струнні і т.д. Відмінністю вібраційних сепараторів є також те, що їх робочий орган переважно встановлюється похило. У промисловості застосовуються вібраційні сепаратори з дебалансними та самобалансними вібраторами та мотор-вібраторами. Останні мають найбільш широке застосування, особливо в установках малих та середніх типорозмірів, за рахунок їх надзвичайної і конструктивної простоти та можливості використання уніфікованого віброприводу. Розрізняють такі типи вібраційних сепараторів, як інерційні, електромагнітні, резонансні (з ексцентриковим приводом).

Інерційні сепаратори, що випускаються, діляться на дві групи: похилі та горизонтальні. В похилих сепараторах в якості приводу використовуються вібратори типу дебалансу, що надають корпусу коловий рух, в горизонтальних – вібратори типу само балансу, що створюють направлену збурюючи силу та забезпечують прямолінійний рух корпусу.

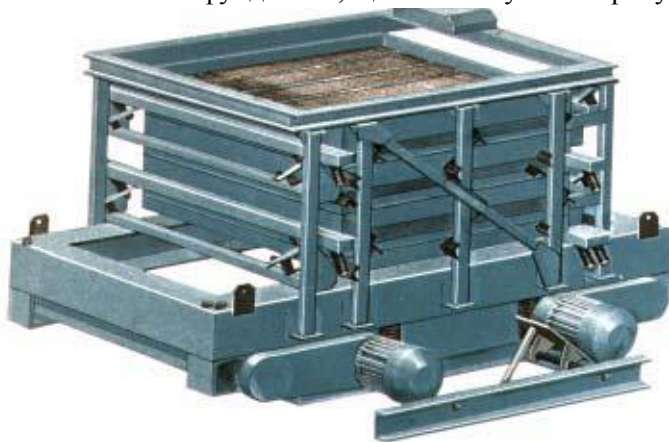
У деяких випадках сепаратори приводяться в рух двома або більше мотор-вібраторами, які прикладають одночасно накладені одна на одну вібрації з різними вимушеними частотами та амплітудами до сита та відповідно до просіюваного середовища. Ці методи забезпечують збільшення розрихлення матеріалу і відповідно ефективності сепарації та використовуються в сепараторах, що мають не менше двох мотор-вібраторів для приводу корпусу сепаратора, причому один або більше вібраторів забезпечують низькочастотне коливання з відносно великою амплітудою, у той час як один або більше інших вібраторів забезпечують вібрацію з меншою амплітудою на більшій частоті.

Однією з найважливіших вимог, що стосуються вібросепараторів є мінімальна необхідність в обслуговуванні, одночасно з високими технічними показниками. Цій вимозі відповідають вібросепаратори в яких в якості приводу використовується мотор-вібратор. Цей привід відкидає

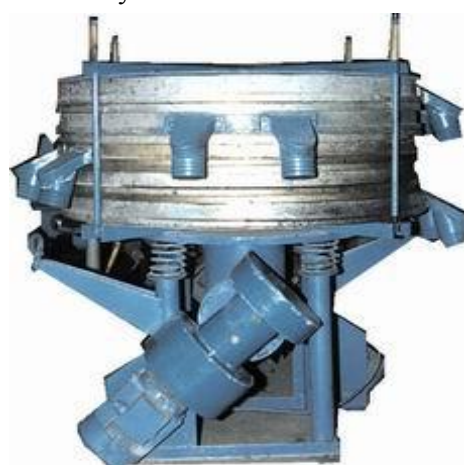
необхідність в яких небудь проміжних передавальних елементах від двигуна до вібратора, таких, як ремені, муфти, ланцюги і т.д. Внаслідок цього зменшуються габарити машини та значно спрощується обслуговування.

Електровібраційні сепаратори використовуються для сепарації в основному сипкої продукції, а також обезводнення та обезпилення. Випускаються також двох типів: похилі та горизонтальні. В електровібраційних сепараторах першого типу коливання звичайно направлені перпендикулярно площині сита, при цьому переміщення матеріалу по ситі здійснюється внаслідок нахилу сита під дією сили тяжіння. У віброустановках цього типу коливання можуть передаватися як всьому корпусу сепаратора так і окремій частині сита. У електровібраційних сепараторах з горизонтальним коливанням корпусу переміщення сипкого середовища здійснюється під дією коливань, що направлені під кутом до напрямку транспортування. Вібратор в даному випадку встановлюється під кутом до сита.

Резонансні вібраційні сепаратори у конструктивному відношенні складніші від інерційних та електромагнітних. Проте вони характеризуються рядом експлуатаційних переваг – високою якістю сепарації, низькою енергоємністю, експлуатаційною надійністю, відсутністю динамічних навантажень на фундамент, що забезпечує їм широку область застосування.



а)



б)

Рис. 1. Загальний вигляд вібраційних сепараторів: а) вібросепаратор з горизонтальним зворотно – поступальним рухом сит; б) вібросепаратор з вертикальним рухом сит.

Продуктивність та інтенсивність роботи вібросепараторів залежить від впливу широкого спектру зовнішніх та внутрішніх чинників на цей процес. Внаслідок цього відбувається складна взаємодія між контейнером вібросепаратора та шаром матеріалу, що сепарується, зміна динамічних характеристик останнього. Ця взаємодія потребує тривалого та складного вивчення і не є повністю дослідженою. Таким чином, вдосконалення вібраційних сепараторів реалізується шляхом створення сприятливих умов для використання живого перерізу сит, поліпшення якості та продуктивності обробки при застосуванні вібраційних методів, покращення умов експлуатації та обслуговування машини, зокрема її виконавчих органів, дослідження руху сипкого середовища на робочих поверхнях. Тому однією з важливих задач є необхідність глибшого розгляду динамічного процесу в сипкому середовищі при вібросепарації.

Формулювання мети дослідження. Рух сипкого середовища на вібруючій поверхні описаний в [2-3]. В цих працях рух сипкого середовища розглядається як рух частинки на поверхні та приймається не пружним. При цьому силою тертя при зіткненнях частинок з поверхнею нехтується. І.І. Блехманом досліджені рухи частинок різної форми по вібруючій поверхні, що виконує гармонійні коливання, поступальні коливання, негармонійні прямолінійні коливання. Виведені диференціальні рівняння руху частинки застосовуються для опису руху сипкого середовища на робочій поверхні вібраційних сепараторів, конвеєрів та живильників. Також сипке середовище розглядалось як система двох частинок, що пов'язані між собою та робочою поверхнею силою сухого тертя. В [5-6] сипке середовище на вібруючій поверхні моделюється як нашарування плоских пружно пластичних балок, товщина яких значно менша за ширину та довжину. В даній статті пропонується продовжити попередні дослідження з метою визначення зміни значень амплітуди та частоти

коливання сипкого середовища за умови, що його власна частота коливань наближається до частоти коливань сита вібросепаратора.

Постановка задачі дослідження. Методи сепарації твердих сипких середовищ полягають у використанні вібраційних сепараторів, в яких, по ситах матеріал рухається так, що менші частинки проходять крізь їх отвори, в той час як великі частинки рухаються вздовж сита. При вібраційній сепарації сипке середовище на ситі виконує складний просторовий зворотно-поступальний рух, який практично неможливо дослідити шляхом описання диференціальних рівнянь, так як останні будуть доволі громіздкі та важкі для дослідження. Тому для спрощення задачі пропонується розділити рух сипкого середовища на горизонтальну та вертикальну складові. Горизонтальний рух сипкого середовища був досліджений в [1-2], тому в даному випадку розглянемо вертикальний рух сипкого середовища на ситі вібраційного сепаратора.

При сепарації сипке середовище здійснює поперечні коливання та одночасно рухається вздовж сита. Швидкість руху сипкого середовища вздовж сита регулюється за рахунок зміни кута нахилу сита до горизонту. При різних об'ємах сипкого середовища на ситі швидкість його руху є різною. Так у відносно тонких шарах сипкого середовища швидкість є найбільшою і зменшується в залежності від зростання товщини шару завантаження не залежно від силових імпульсів, що діють між частинками. Загалом чим тонший шар, тим більша швидкість сепарації, проте таке явище характерне лише до певної межі, після якої інтенсивність процесу сепарації спадає. Під час сепарації сипке середовище розрихлюється та ділиться за фракціями. Моделюючи сипке середовище як нашарування плоских пружно-пластичних балок, припустимо, що йому властивий певний “умовний модуль пружності”. Якщо матеріал сипкого середовища задовольняє закон пружності, а “умовний модуль пружності” у ньому є змінною величиною, у зв'язку з тим, що дрібніші частинки відсіюються, то:

$$\sigma = E(x) \cdot \varepsilon \quad (1)$$

де σ – нормальне напруження у шарі завантаження; $\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x}$ – відносна деформація шару завантаження; $u = u(t)$ – поперечне переміщення довільного перерізу моделі середовища за деякий момент часу t . $E(x)$ – модуль пружності середовища.

Лінійний закон Фогта в даному випадку використаний для описання руху сипкого середовища, як деякого суцільного матеріалу, що описуються лінійними диференціальними рівняннями. Проте необхідність опису нелінійних пружних властивостей спонукає подати цей закон в нелінійній формі.

Опишемо закон зміни “умовного” модуля пружності для сипкого середовища:

$$E(x) = \frac{k}{k+1} e^{\gamma \cdot x} \quad (2)$$

де γ – коефіцієнт, що характеризує пружні властивості сипкого середовища;

Враховуючи, що швидкість руху шару сипкого середовища вздовж сита є сталою, фізико-механічні характеристики змінні та сипке середовище здійснює тільки вільні коливання, то диференціальне рівняння його руху буде мати наступний вигляд:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{E(x)I}{\rho} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = - \left[V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2V \frac{\partial u}{\partial x \partial t} + \gamma^2 \sigma \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \frac{E(x)I}{\rho} + 2\gamma \sigma \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \frac{E(x)I}{\rho} \right], \quad (3)$$

де V – швидкість руху сипкого середовища вздовж сита вібросепаратора; ρ – густина сипкого середовища; $\frac{\partial u}{\partial t}$ – відносна деформація умовно виділеного шару сипкого середовища вздовж осі x ; $\frac{\partial u}{\partial x}$ – швидкість шару сипкого середовища; I – момент інерції сипкого середовища.

При цьому перше наближення рівняння (3) за умови контакту сипкого середовища із ситом вібраційного сепаратора, можна подати у вигляді:

$$u = a(t) \sin\left(\frac{k\pi}{l}x\right) \cdot \cos\psi(t), \quad (4)$$

де a - амплітуда коливань сипкого середовища; $\psi = \omega t + \varphi$ - фаза коливань сипкого середовища; l - довжина сита вібраційного сепаратора; $k = 1, 2, 3, \dots, n$; ω - власна частота коливань сипкого середовища:

$$\omega = \frac{k\pi}{l} \alpha \quad (5)$$

де $\alpha = \frac{ES}{\rho}$ - параметр, що враховує основні фізико – механічні характеристики сипкого середовища.

Особливість динамічних процесів нелінійних систем із зосередженими масами та розподіленими параметрами є те, що в резонансному випадку частота зовнішнього збурення наближується до частоти власних коливань, тобто $\mu \approx m\omega + n\mu$. Вважатимемо, що при проходженні через резонанс частота зовнішнього збурення:

$$\mu = (\omega + 2) - 0,4t \quad (6)$$

Для визначення закону зміни амплітуди та частоти коливань шару сипкого середовища з рівняння (4) отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \frac{1}{2\pi\omega} \int_0^l \int_0^{2\pi} \left(\gamma^2 \delta \frac{E(x)I}{\rho} \left(\frac{k\pi}{l}\right)^2 + a \sin^2\left(\frac{k\pi}{l}x\right) \sin\psi \cos\psi - \delta \frac{E(x)I}{\rho} \left(\frac{k\pi}{l}\right)^4 \times \right. \\ \left. \sin\left(\frac{k\pi}{l}x\right) \sin\psi \cos\psi - 2\gamma\delta \left(\frac{k\pi}{l}\right)^3 \cos\left(\frac{k\pi}{l}x\right) \sin\left(\frac{k\pi}{l}x\right) \sin\psi \cos\psi \right) dx d\psi; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \omega - \mu + \frac{1}{2\pi a \omega} \int_0^l \int_0^{2\pi} \left(V^2 \left(\frac{k\pi}{l}\right)^2 a \sin\left(\frac{k\pi}{l}x\right) \cos^2\psi + \gamma^2 \delta \frac{E(x)I}{\rho} \left(\frac{k\pi}{l}\right)^2 a \sin^2\left(\frac{k\pi}{l}x\right) \times \right. \\ \left. \cos^2\psi - \delta \frac{E(x)I}{\rho} \left(\frac{k\pi}{l}\right)^4 \sin^2\left(\frac{k\pi}{l}x\right) \cos^2\psi - 2\gamma\delta \left(\frac{k\pi}{l}\right)^3 \times \right. \\ \left. \times \cos\left(\frac{k\pi}{l}x\right) \sin\left(\frac{k\pi}{l}x\right) \cos^2\psi \right) dx d\psi$$

Вважаючи, що при проходженні резонансу частота зовнішнього збурення наближається до частоти власних коливань сипкого середовища. Тоді розв'язки рівняння (5) матимуть наступний вигляд:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \frac{\delta}{8\pi\omega} \left(\frac{k\pi}{l}\right)^2 \frac{I}{\rho} \left(a l \gamma^2 - 2\gamma \left(\frac{k\pi}{l}\right) \right); \quad (8)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \omega - \mu + \frac{l}{a\omega} \left(a l V^2 \left(\frac{k\pi}{l}\right)^2 + \left(\left(\frac{k\pi}{l}\right)^2 \left(\gamma^2 \delta - \delta l \left(\frac{k\pi}{l}\right)^2 - 2\gamma\delta \left(\frac{k\pi}{l}\right) \right) \right) \right)$$

На основі отриманих диференціальних рівнянь (5), (6) та (8) побудуємо графічні залежності впливу швидкості руху сипкого середовища вздовж сита вібраційного сепаратора на амплітуду та частоту коливаний сипкого середовища.

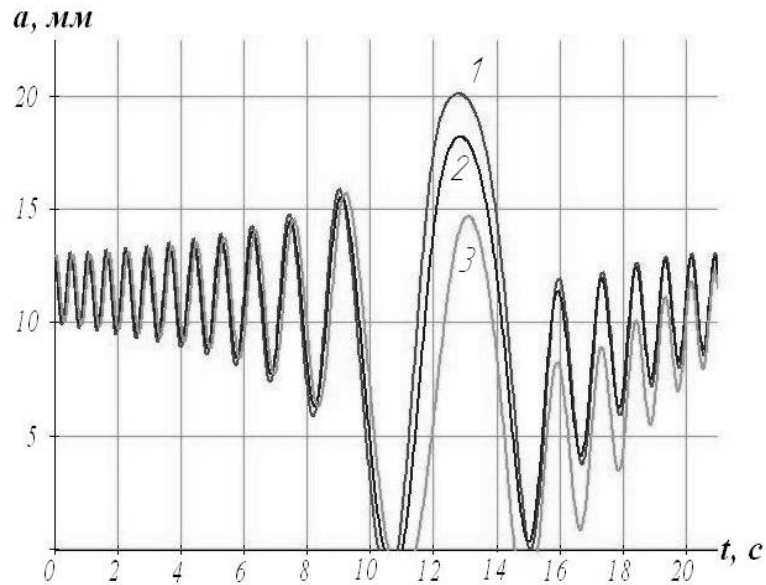


Рис. 2. Графік залежності амплітуди коливань сипкого середовища від швидкості руху сипкого середовища вздовж сита: 1. $V=1,5$ м/с; 2. $V=1,2$ м/с; 3. $V=1$ м/с.

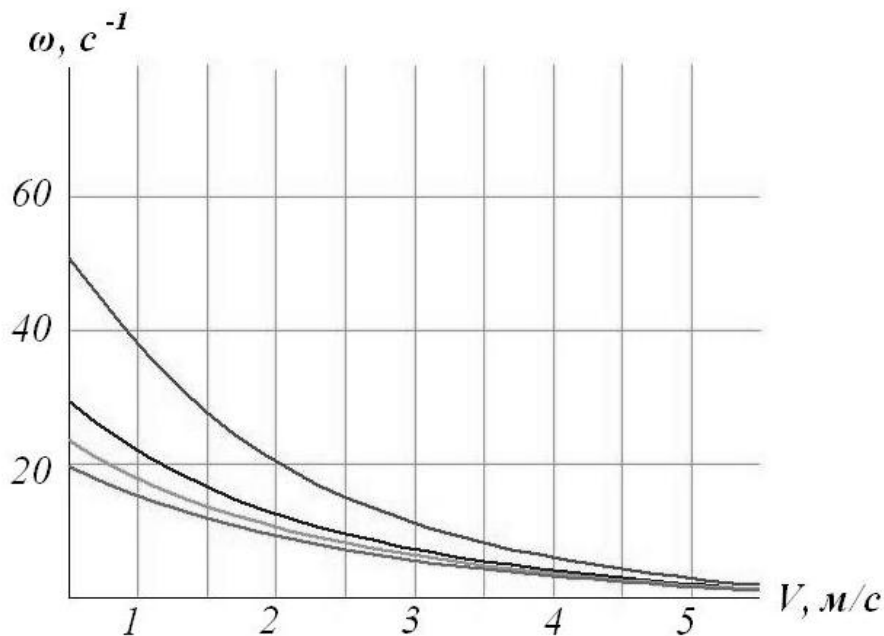


Рис. 3. Графік залежності зміни частоти коливань від швидкості руху сипкого середовища вздовж сита.

Висновки. Представлені на рис.2 та рис.3. графічні залежності показують, що незалежно від початкового значення частота власних коливань сипкого середовища спадає із зростанням його швидкості руху вздовж сита вібросепаратора, а його резонансна амплітуда зростає. Резонансне значення амплітуди коливань сипкого середовища при зростанні швидкості руху вздовж сита спочатку зростає, а потім спадає. Як відомо, резонанс у сипкому середовищі сприяє більш ефективному його розділенню, тому найбільш продуктивним буде процес сепарації незалежно від пружних властивостей сипкого середовища за умови, що швидкості руху сипкого середовища вздовж сита будуть мати малі значення та не перевищувати 1,2 – 1,5 м/с. Збільшення швидкості руху сипкого середовища вздовж сита вібраційного сепаратора призводить до зниження частоти коливання і відповідно зменшує продуктивність процесу сепарації.

2. Гензев Г.А. Вопросы динамики сыпучей среды / Г.А. Гензев // ЦНИИ строит. констр. им. В.А. Кучеренко. М. Госстройиздат.–1958.–вип. 2.–122 с.
3. Гончаревич И.Ф. Вибрационные грохоты и конвейеры./ И.Ф. Гончаревич, В.Д.Земсков, В.И.Корешков. – М., Госгортехиздат – 1960. – 380 с.
4. Ребот Д.П. Формування динамічних параметрів та підвищення ефективності вібросепараторів сипких середовищ: Автореф. Дис...к-та техн. наук: 05.02.09. / Національний ун-т “Львівська політехніка”. – Львів, 2001. – 36 с.
5. Ребот Д.П. Динаміка сипкого середовища при вібросепарації / Д.П. Ребот // ПНТУ Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2009. – вип. 3(25). – с. 188 – 192.
6. Боголюбов Н.Н., Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. / Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митропольский //Москва, изд. Наука.–1974.– 504 с.