

Котов Б. І.

Деревенько І. А.

*Вінницький  
національний аграрний  
університет*

Степаненко С. П.

Попадюк І. М.

*Національний науковий  
центр "Інститут  
механізації та  
електрифікації  
сільського  
господарства"*

Kotov B. I.

Derevenko I. A.

*Vinnitsia National  
Agrarian University*

Stepanenko S. P.

Popadyuk I. M.

*National Scientific Center  
"Institute for Agricultural  
Engineering and  
Electrification"*

**УДК 631.362:532**

## **ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА СТУПІНЧАСТО-КОНІЧНОМУ РЕШЕТІ ВІБРОВІДЦЕНТРОВИХ МАШИН**

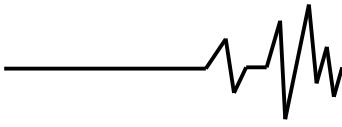
*В статті наведено теоретичний аналіз переміщення частинки зернового матеріалу в шарі і на поверхні при сепарації зернової суміші ступінчасто-конічним решетою у вібропневмовідцентровому сепараторі. Показано, що ефективність процесу розділення зерна на вібровідцентровому решеті визначається інтенсивністю переміщення дрібних частинок через товщу шару зерна до поверхні решета (і просіювання крізь нього) і швидкістю пересування шару вздовж твірної конічної поверхні. Отримано диференціальні рівняння руху часток у віброзрідженому шарі при дії відцентрової сили і аеродинамічного тиску, та рівняння відносного руху частинки вздовж твірної конічної поверхні вібровідцентрового решета. Визначено ефект гальмування поступового руху шару у вертикальному напрямку за рахунок конічності поверхні оберненої більшим діаметром проти напрямку руху.*

*Ключові слова: вібрації, обертання, рух частинки, сепарація, ступінчасто-конічне решето, рівняння руху.*

**Постановка проблеми.** На сучасному рівні сільськогосподарського машинобудування, одним із резервів підвищення ефективності освоєного обладнання є вдосконалення окремих робочих органів на основі нових принципів інтенсифікації технологічних операцій при використанні існуючої елементної бази зернопереробних машин. В цьому плані набуває доцільність технічного вдосконалення решітних вібровідцентрових зерносепараторів, які практично досягли межі можливого підвищення ефективності при використанні

циліндричних решіт. Пояснюється це тим, що при робочих режимах циліндричного решета відсутні інтенсифікуючі впливи в напрямку радіального переміщення окремих зернин в кільцевому шарі зерна і малої швидкості переміщення; швидкість вертикального переміщення шару занадто велика і прохідна фракція не встигає повністю виділитись.

Конічна форма поверхні решета дозволяє інтенсифікувати видалення прохідної фракції, знизити швидкість переміщення зерноматеріалу збільшуючи час фактичної



сепарації. Використання конічно-ступінчастої поверхні збільшує робочу довжину решета і шлях переміщення матеріалу вздовж нього.

Кількість режимів вібровідцентрового сепаратора виключно багаточисельна і проведення експериментів без ретельного теоретичного дослідження малоефективне.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** свідчить, що в загальній проблемі підвищення ефективності сепарації зернових матеріалів значна увага приділяється дослідженням процесів у вібровідцентрових сепараторах [1-4, 6]. Процеси вібраційного переміщення матеріалу по ротаційних поверхнях досліджені П.М. Заїкою, Є.С. Гончаровим, Н.Е. Авдєєвим, А.І Бочкарьовим, С.І. Малютою та іншими дослідниками узагальнені в монографії Л.М. Тіщенко [7]. Дослідження окремих, процесів вібровідцентрової сепарації зернових сумішей подані в роботах [3, 5, 8]. Досліджено, в основному, процес переміщення частинок у віброзрідженому шарі по поверхні, яка обертається і здійснює коливальний рух під дією окремих сил. Комплексна дія вібраційного відцентрового і аеродинамічного полів на процеси в сепараторах із секціонованим роторним решетом вивчено недостатньо.

**Мета роботи** дослідити і проаналізувати механіку пливу сил інерції і повітряного тиску на частинки зернового матеріалу в шарі і на поверхні ступінчастого конічного решета.

**Результати досліджень.** У вібровідцентрових сепараторах розділяючі решета мають форму поверхонь обертання (циліндрична, конічна, параболічна). Переваги циліндричних решіт оцінюються виключно простотою і технологічністю виготовлення, але в плані вдосконалення технології сепарації вони мають певні недоліки. Конічні розділяючі поверхні мають суттєві переваги, використання яких можна значно інтенсифікувати процес решітного поділу зернових матеріалів, як за розміром так і за комплексом фізико-механічних властивостей.

Схематизація процесу сепарації зерноsumіші на ступінчато-конічному решеті дозволяє визначити механізм впливу різних факторів на процеси переміщення частинки матеріалу поверхневого і всередині шару, а математичним описом якісно і кількісно оцінити показники (параметри) процесу.

Відомо [6, 7], що ефективність процесу сепарування визначається переважно двома факторами: інтенсивністю переміщення дрібних частинок з глибини шару матеріалу, що сепарується до поверхні решета і інтенсивністю

просіювання їх крізь отвори решета. Вплив першого фактору визначається переважно станом шару матеріалу, що рухається вздовж поверхні (його пористістю, розпушеністю, інтенсивністю взаємного переміщення частинок). Інтенсивність просіювання залежить від швидкості руху на поверхні решета.

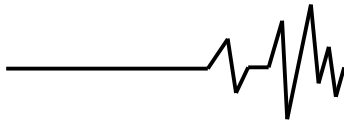
Швидкість переміщення шару матеріалу і його розпушеність залежать від частоти коливного руху решета (у вертикальному напрямку). Так при збільшенні частоти коливань швидкість переміщення часток на поверхні збільшується, що призводить до зниження інтенсивності просіювання прохідової фракції (при великих швидкостях руху зерна на решеті зменшується вірогідність попадання частинки у отвір [6]). При цьому інтенсифікується розпушування зернового шару, що сприяє збільшенню швидкості переміщення частинки в середині шару прохідової фракції до поверхні решета. В циліндричному решеті, це призводить до зниження ефективності виділення дрібної фракції з основної частини шару.

Усічена конічна поверхня розташована на вісі обертання більшим перетином проти напрямку руху зернового шару (донизу). Саме це забезпечує необхідне зниження швидкості руху вздовж поверхні, за рахунок дії складової відцентрової сили, що спрямована вздовж твірної конуса вгору. В таких умовах частки меншої ваги або розміру частіше попадають у отвори решета (чим, наприклад, у циліндричному решеті), при однакових умовах.

Тут слід зауважити, що площа конічної поверхні у верхній частині обертового конуса має максимальне значення, що сприяє розсіюванню потоку зернового матеріалу по поверхні і відповідному зменшенню товщини шару, що і сприяє збільшенню кількості видаленої прохідової фракції на одиницю довжини решета.

Таким чином, в процесі переміщення шару зернового матеріалу на конічній обертальній поверхні, що здійснює гармонічні коливання вздовж вертикальної вісі при інтенсифікації вібраційного впливу (збільшення частоти коливань) зростає розпушеність шару, збільшується швидкість переміщення частинки до поверхні решета і швидкості руху часток по поверхні решета; при цьому на початковій ділянці решета (більша основа конуса) товщина шару має мінімальне значення.

Просуваючись далі вздовж конічної поверхні донизу, швидкість переміщення знижується (за рахунок зменшення дії відцентрової сили) зменшення швидкості і площі перетину шару зерна призводить до



збільшення його висоти, але в результаті просіювання дрібної фракції (її видалення із шару) висота останнього залишається практично незмінною.

Дія радіальної складової сили інерції в переносному коливальному русі суттєво збільшує розпушеність рухомого шару зерна, що інтенсифікує процес переміщення зернівок всередині шару до поверхні решета та їх просіювання крізь нього. Тому при інших рівних

умовах ступінчасто-конічне решето більш ефективно і інтенсивно повинно поділяти зерновий матеріал на фракції.

Враховуючи однакову фізичну сутність процесів сепарування зерна вібровідцентровими решетами за аналогією з [3, 7] можна представити диференціальними рівняннями переміщення частинки всередині шару зернового матеріалу на конічній поверхні ступінчастого решета у вигляді:

$$\begin{cases} mx'' = m_1 A \omega^2 \sin \omega t \cdot \cos \beta - m_1 g \cos \beta + m_1 \Omega^2 x \sin \beta + R_{cx} \frac{x'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}} \\ my'' = m_1 A \omega^2 \cos \omega t \cdot \cos \beta - m_1 g \sin \beta + m_1 \Omega^2 x \cos \beta + R_{cy} \frac{y'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $m_1 = m - m_0$ ;  $m$  – маса частинки;  $m_0$  – маса зернового шару в об'ємі частки (маса середовища);  $A, \omega, \Omega$  – амплітуда коливань, частота коливального і обертального руху ротора;  $\beta$  – кут нахилу твірної до вісі обертання;  $R_{cx}, R_{cy}$  – проекції сили опору переміщенню частки;  $y$  – координата вздовж твірної конуса;  $x$  – координата перпендикулярна до твірної конусу;  $t$  – час.

Якщо прийняти відповідно до [3] силу опору  $R_o$  пропорційною швидкості переміщення  $V = \sqrt{x'^2 + y'^2}$  частки і коефіцієнту вібров'язкості  $k_\mu = k(\omega, A, V)$

$$R_o = k_\mu \cdot \bar{V}, \quad (2)$$

то рівняння системи лінеаризуються і їх можна подати у вигляді:

$$A_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + B_1 \frac{dy}{dt} + C_1 y = D_1 + P_1 \sin \omega t, \quad (3)$$

$$A_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + B_2 \frac{dx}{dt} + C_2 x = D_2 + P_2 \sin \omega t, \quad (4)$$

де  $A_{1,2} = m$ ;  $B_{1,2} = -k_\mu$ ;  $C_1 = m_1 \Omega^2 \cos \beta$ ;

$$C_2 = m_1 \Omega^2 \sin \beta; \quad D_1 = P_v + m_1 g \sin \beta;$$

$$D_2 = m_1 g \cos \beta; \quad P_1 = m_1 A \omega^2 \sin \beta;$$

$P_2 = m_1 A \omega^2 \cos \beta$ ;  $P_v$  – сила аеродинамічного тиску на частку зерна в шарі.

Розв'язок неординарних диференціальних рівнянь другого порядку при початкових умовах:  $t = 0$ ;  $y = y_0$ ;  $x = x_0$ ;

$y_0 = \frac{R_o}{\cos \beta}$  (де  $R_o$  – радіус нижньої основи конуса),

$\frac{dy}{dt} = \frac{dx}{dt} = 0$  знайдемо у вигляді:

$$\begin{aligned} x(y), y(t) = & C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} + \\ & + \frac{D_i}{C_i} - \frac{P_i}{a^2 + b^2} (b \sin \omega t - a \cos \omega t), \end{aligned} \quad (5)$$

де  $a = c - A_i \omega^2$ ,  $b = B_i \omega$ ,

$$r_{1,2} = \frac{-B_i \pm \sqrt{B_i^2 - 4A_i C_i}}{2A_i},$$

$$C_2 = \frac{r_1 + r_2}{r_1} \left[ \frac{R_o}{\cos \beta} - \frac{D_i}{C_i} - \frac{P_i}{a^2 + b^2} \left( a - \frac{b\omega}{r_1} \right) \right],$$

$$C_1 = \frac{P_i b \omega}{r_1 (a^2 + b^2)} + \frac{r_2}{r_1} C_2, \quad i = 1, 2.$$

На рис. 1а, 1б наведені графіки зміни переміщення частки за часом, а на рис. 2 траєкторія руху частки у віброзрідженому шарі.

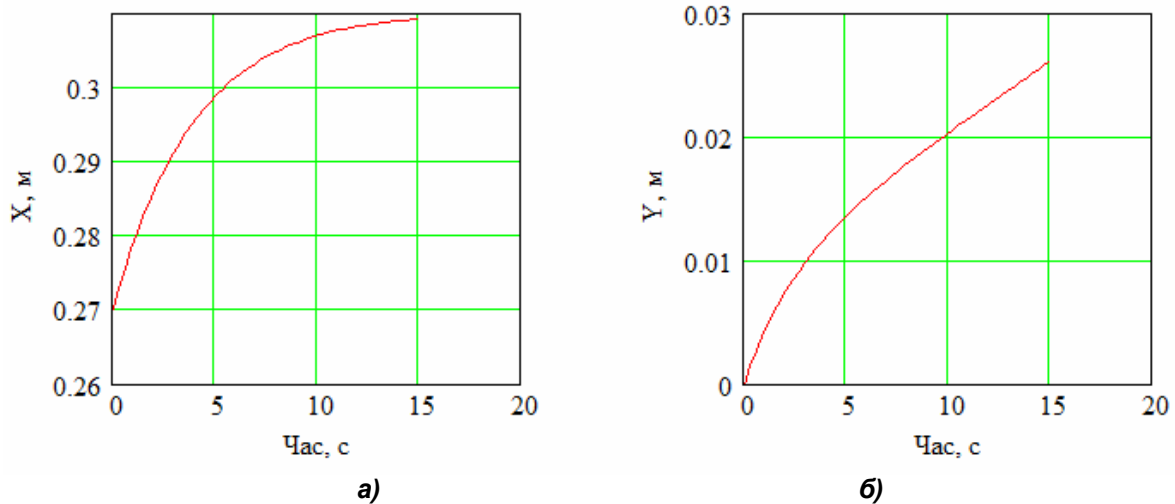
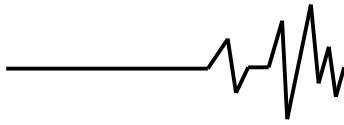


Рис. 1. Зміна переміщення частки у віброзрідженому шарі

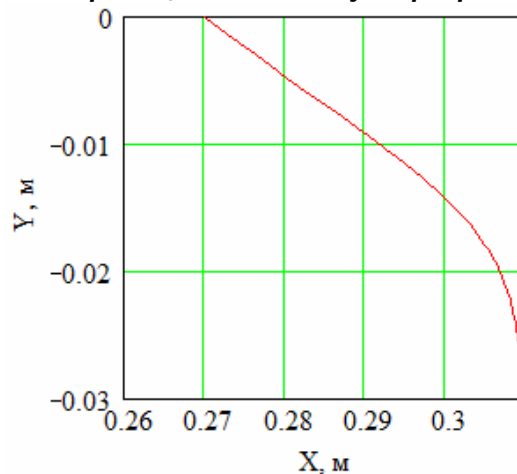


Рис. 2. Траєкторія руху частки у віброзрідженому шарі.

Сила опору переміщенню частки у віброзрідженому шарі має складну залежність від стану зернового матеріалу, що характеризується пористістю  $\varepsilon$ , коефіцієнтом внутрішнього тертя  $f$ , "густиною" шару зерна  $\rho$ , вібраційним ущільнення зернової "постілі", що характеризується коефіцієнтом  $k_y$  і може бути наближено [3] визначена

$$R_c = \frac{3\pi}{5} r_r^3 f_1 \rho (1 - \varepsilon) q (1 + 0.12 f_1) k_y. \quad (6)$$

Але для практичних розрахунків руху частки в середині шару краще користуватися поняттям вібраційного коефіцієнта в'язкості

(вібров'язкості), який можна визначити за емпіричною формулою

$$k_\mu = (0.6 - 0.7) 1.28^{A\omega} 0.85^V, \quad (7)$$

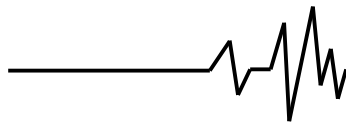
де  $V$  – швидкість повітряного потоку на вході в шар.

Відповідний рух шару зернового матеріалу вздовж конічної поверхні, як прийнято [5] моделюється переміщенням окремої матеріальної частинки. При наявності додаткової дії на частку сили повітряного потоку диференціальні рівняння руху частки вздовж конічної поверхні решета сепаратора (вздовж твірної можна представити у вигляді:

$$m \xi_+ = -mg \cos \beta + m \omega^2 A \sin \omega t + m \Omega^2 \bar{R} \sin \beta - fN, \quad (8)$$

$$m \xi_- = -mg \cos \beta - m \omega^2 A \cos \omega t + m \Omega^2 \bar{R} \sin \beta + fN, \quad (9)$$

$$N = m \Omega^2 \bar{R} \cos \beta + mg \sin \beta - m \omega^2 A \sin \omega t - mg k_b, \quad (10)$$



де  $N$  – величина нормальної реакції поверхні;  $k_b = \frac{V_v^2}{V_{vit}}$  – коефіцієнт питомого тиску повітря;  $\xi_{+,-}$  – переміщення частинки вгору та донизу;  $V_{vit}$  – критична швидкість частки.

Для регулярного безвідривного режиму переміщення частки з миттєвими зупинками рівняння (8) – (10) мають стандартний розв'язок. Результати розв'язку подано на рис. 3 у вигляді залежності швидкості переміщення частки вздовж твірної конічної поверхні від частоти коливань решета та напрямку подачі повітря.

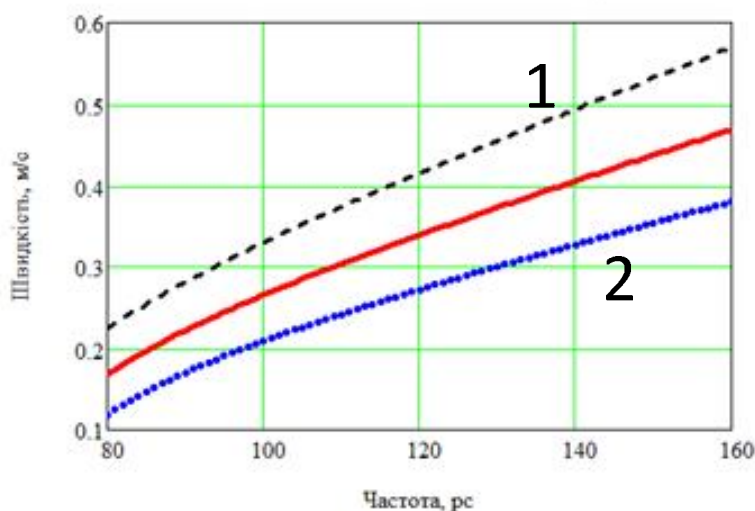


Рис. 3. Залежність швидкості переміщення частинки вздовж твірної конуса в залежності від частоти коливань при подачі повітря: 1 – на решето; 2 – від решета

#### Висновки

1. Розроблено математичні моделі, що описують рух частинки у віброзрідженому шарі і самого шару зерноsumіші по поверхні ступінчасто-конічного решета при дії відцентрової сили і аеродинамічного тиску.

2. Отримано спрощені формули для розрахунку переміщення частинки в шарі і траєкторії її руху.

3. Визначено суттєвий вплив повітряного потоку нормально спрямованого до решета на швидкість переміщення шару зерна.

#### Список використаних джерел

1. Авдеев Н.Е. Центробежные сепараторы для зерна / Н.Е. Авдеев. – М.: Колос, 1975.

2. Бочкарев А.И. Исследование сепарации семян вибро центрифугированием. Автореф. дис. д.т.н. – Волгоград: 1970. – 38 с.

3. Бредихин В.В. Обґрунтування параметрів процесу вібропневмовідцентрового розділення насіннєвих сумішей за густиною насіння. Автореф. дис. к.т.н. – Харків: 2003. – 20 с.

4. Котов Б.И. Дослідження шляхів підвищення ефективності віброрешітних

сепараторів зерна і насіння // Б.И. Котов, С.П. Степаненко, М.Г. Пастушенко //Вибрации в технике и технологиях. – 2004. – № 3 (35). – С.61–63.

5. Заика П.М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах / П.М. Заика – К.: УСХА. – 499 с.

6. Гончаров Е.С. Ступенчатое решето для виброцентробежных зерновых сепараторов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – К.: Урожай, 1984. – Вып. 30. – С.33–36.

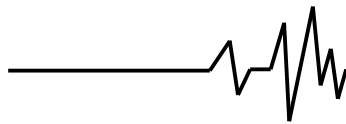
7. Тищенко Л.Н. Интенсификация сепарирования зерна / Л.Н. Тищенко. – Харьков: Основа, 2004. – 224 с.

8. Малюта С.И. Обоснование технологического процесса и параметров семяочистительной пневмоцентрифуги: Автореф. дис. к.т.н. – Глеваха, 1989. – 21 с.

#### Список джерел в транслітерації

1. Avdeev N.E. Centrobezhnye separatory dlja zerna / N.E. Avdeev. – М.: Kolos. 1975.

2. Bochkarev A.I. Issledovanie separacii semjan vibro centrifugirovaniem. Avtoref. dis. d.t.n. – Volgograd: 1970. – 38 s.



3. Bredihin V.V. Obruntuvannja parametriv procesu vibropnevmovidcentrovogo rozdilennja nasinnevih sumishej za gustinoju nasinnja. Avtoref. dis. k.t.n. – Harkiv: 2003. – 20 s.

4. Kotov B.I. Doslidzhennja shljahiv pidvishhennja effektivnosti vibroreshitnih separatoriv zerna i nasinnja // B.I. Kotov, S.P. Stepanenko, M.G. Pastushenko //Vibracii v tehnike i tehnologijah. – 2004. – № 3 (35). – S.61–63.

5. Zaika P.M. Vibracionnoe peremeshhenie tverdyh i sybuchih tel v sel'skohozjajstvennyh mashinah / P.M. Zaika –K.: USHA. – 499 s.

6. Goncharov E.S. Stupenchatoe resheto dlja vibrocentrobezhnyh zernovyh separatorov // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. – K.: Urozhaj, 1984. – Vyp. 30. – S.33–36.

7. Tishhenko L.N. Intensifikacija separirovaniya zerna / L.N. Tishhenko. – Har'kov: Osnova, 2004. – 224 s.

8. Maljuta S.I. Obosnovanie tehnologicheskogo processa i parametrov semjaochistitel'noj pnevmocentrifugi: Avtoref. dis. k.t.n. – Glevaha, 1989. – 21 s.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СЕПАРАЦИИ ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СТУПЕНЧАТО-КОНИЧЕСКОМ РЕШЕТЕ ВИБРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ МАШИН

**Аннотация.** В статье приведено теоретический анализ внутрислоевого и поверхностного перемещения частицы при сепарации зерновой смеси ступенчато-коническим решето в виброцентробежном сепараторе. Показано, что эффективность процесса разделения зерна на виброцентробежном решете определяется интенсивностью перемещения мелких частиц через толщину слоя к поверхности (и просеивания) и скоростью передвижения слоя

вдоль образующей конической поверхности. Получены дифференциальные уравнения движения частицы в виброцентрированном слое при действии центробежной силы и аэродинамического давления, и уравнения относительного движения частицы по образующей конической поверхности виброцентробежного решета. Определен эффект торможения поступательного движения слоя в вертикальном направлении за счет коничности поверхности обращенной большим диаметром вверх.

**Ключевые слова:** вибрации, вращение, движение частицы, сепарация, ступенчато-коническое решето, уравнение движения.

#### THEORETICAL ASPECTS OF SEPARATION OF GRAIN MATERIALS ON THE CONICAL MESH WHICH FLUCTUATES AND TURNS

**Annotation.** In the article the theoretical analysis intralayer and surface movement of particles for the separation of grain mixtures stupenchasto-conical sieve in vibrocentrifugal separator. The efficiency of the separation process vibrocentrifugal grain on the sieve is determined by the intensity fine particles move through the thickness of the surface layer (and screening) and the speed of movement of the layer along the generatrix of the conical surface. Differential equations of motion of particles in vibroszhizhenom layer under the action of centrifugal force and aerodynamic pressure, and equation of the relative motion of the particle by forming a conical surface vibrocentrifugal sieve. Detected braking effect translational movement layer in the vertical direction by konichnosti surface facing the large diameter upwards.

**Key words:** vibration, rotation, movement of particles, separation, stupenchasto-conical sieve, the equation of motion.