

**Омельянов О.М.**

ассистент

*Вінницький національний  
аграрний університет***Omelyanov O.***Vinnitsa National Agrarian  
University***УДК 621.921****ОБГРУНТУВАННЯ ВПЛИВУ  
МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ НА  
ПРОЦЕС ОБРОБКИ СИПКОЇ  
МАСИ**

У статті представлено математичний опис процесу вібраційної обробки сипкої сировини. Вібраційна машина розглядається як система, що здійснює вимушені коливання під дією збурюючої сили, що не залежить від коливань веденого робочого органу. На основі результатів вивчення впливу механічних коливань на процес сепарації сипкої продукції робиться спроба намітити підхід до вирішення завдань теорії впливу механічних коливань на технологічні процеси.

**Ключові слова:** вібротранспортування, механічні коливання, сепарація, сипкий матеріал.

**Постановка проблеми.** Завдяки відомим роботам [1, 2, 4, 6, 11] в розвитку теорії і техніки впливів механічних коливань на технологічні процеси досягнуто значних успіхів. Однак розробити загальний підхід до вирішення завдань цієї теорії, при якому були б воедино пов'язані всі аспекти цієї проблеми, поки не вдається. Стаття представляє собою спробу намітити такий підхід на основі результатів вивчення впливу механічних коливань на процес сепарації сипкої продукції. Пропоновані аналітичні рішення не є остаточними, їх використання дозволило дати пояснення деяким важливим експериментальним фактам. Теоретичні передумови, викладені в статті, адекватні отриманим експериментальним даним.

**Мета досліджень.** Метою є теоретичне обґрунтування інтенсифікації процесу сепарації сипкої сировини за допомогою механічних коливань та параметрів роботи машини з віброючим робочим органом.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Математичний опис процесу, створення математичної моделі, що відбиває фізичні, в основному механічні, взаємодії в процесі обробки сипкої сировини можливо тільки після з'ясування фізичної сутності процесу, тобто взаємодії всіх складових (тіла та середовища), що задіяні процеси.

Обробка в вібраційному полі супроводжується значним прискоренням процесів, що сприяють відриву частинок, слабо пов'язаних з робочою поверхнею. Інтенсифікація, під впливом вібрації лотків, викликається зіткненнями частинок з перфорованою поверхнею при

вібротранспортуванні, а також падінням тіл з одного лотка на інший.

З метою визначення імпульсу миттєвих сил тиску і впливу висоти падіння на його величину розглянемо процес переорієнтації тіла (частинки) при його падінні з попереднього лотка на наступний. При цьому відбувається прямий пружний удар тіла масою  $m_1$  об поверхню маси лотка  $m_2$ .

Застосовуючи теорему про зміну кінетичної енергії, маємо:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} - \frac{m_1 v_0^2}{2} = m_1 g h, \quad (1)$$

де  $m_1$  - маса тіла;  $v_1$  - швидкість тіла в момент зіткнення з поверхнею лотка;  $v_0$  - складова швидкості вібротранспортування тіла по вертикалі;  $h$  - висота падіння тіла;  $g$  - прискорення вільного падіння.

$$\text{Звідки: } v_1 = \sqrt{2gh + v_0^2} \quad (2)$$

На основі теореми про зміну кількості руху отримуємо формулу для імпульсу миттєвих сил тиску:

$$F = \frac{m_1 m_2 (v_1 - v_2)}{m_1 + m_2}, \quad (3)$$

де  $F$  - імпульс миттєвих сил тиску;  $m_2$  - маса лотка;  $v_2$  - складова швидкості руху

Приймаючи, що  $m_2 \gg m_1$ , а  $v_2 = 0$ , остаточно отримуємо:



$$F = m_1 v_1 = m_1 \sqrt{2gh + v_0^2} \quad (4)$$

Аналогічним чином, використовуючи рівняння зміни кількості руху можна визначити імпульс, що діє на тіло під час його зіткнення з лотком при вібротранспортуванні.

Таким чином, використання низькочастотних механічних коливань (вібрацій) дозволяє збільшити кількість контактів і поверхню торкання частинки з віброуючою поверхнею лотків, тобто інтенсифікувати процес сепарації сипкої сировини.

Визначення швидкості вібротранспортування і продуктивності.

Аналіз процесів грохочіння різноманітної сипкої сировини показує, що найбільш раціональним напрямком удосконалення цього процесу є розробка нових вібраційних машин з робочим органом, що передає коливання безпосередньо продукту. При моделюванні процесу вібротранспортування продукту на віброуючій шорсткій площині слід перш за все визначити ряд важливих показників процесу: швидкість транспортування, продуктивність, потужність і параметри вібрації [12].

Продуктивність вібраційних сепаруючих машин залежить від швидкості переміщення продукту по віброуючій поверхні. Ця швидкість, в свою чергу, визначається законом, величиною амплітуди, частоти і напрямком коливань робочого органу, кутом нахилу його до горизонту. На рух продукту по віброуючій поверхні впливає його в'язкість, висота шару, форма частинок продукту, вологість, липкість і пружність частинок, сили внутрішнього і зовнішнього тертя, повітропроникність та інші чинники.

Таке розмаїття чинників, які визначають процес сепарації при вібраційному транспортуванні, ускладнює його дослідження аналітичними методами і ставить відомі межі використання і узагальнення результатів експериментів.

З метою інтенсифікації процесу грохочіння аналітичне дослідження транспортування продукту в робочому органі машини повинно передбачати вібропереміщення в режимі безперервного, інтенсивного підкидання і складатися з швидких малих переміщень окремих частинок, кратних періоду змушених коливань.

Існуючі способи визначення середньої швидкості вібротранспортування не дають достатньої точності, зважаючи на складність визначення проміжків часу перебування продукту (у вигляді матеріальної точки) у вільному польоті, спільному русі з лотком і проковзуванні продукту (точки) щодо нього.

Теоретична модель зводиться до аналізу руху тіла масою  $m$  по перфорованій поверхні вібраційного лотка. Дослідження з урахуванням всіх факторів, які впливають на швидкість руху тіла по лотку, являє собою складну задачу [3,7,12]. Тому при теоретичному дослідженні приймаємо ряд припущень:

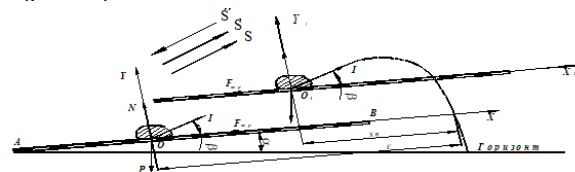
- коефіцієнт тертя пари лоток-продукт прийнятий постійним, що не зовсім відповідає дійсності;

- розглядається рух по лотку одного ізольованої частинки з постійними фізичними показниками; в дійсності частинки по лотку рухаються у взаємодії одного з іншим, а показники змінюються;

- опір потоку повітря при переміщенні продукту по поверхні лотка не враховується.

Ці припущення спрощують дослідження і не повинні привести до значних відхилень від дійсності.

Розглянемо лоток, що здійснює прямолінійні гармонійні коливання з частотою  $\omega$  і амплітудою  $A$  в напрямку, який утворює кут  $\beta$  з його площиною; кут нахилу лотка до горизонту  $\alpha$  (рис. 1).



**Рис. 1. Розрахункова схема вібротранспортування частинки**

На тіло масою  $m$  діє сила тяжіння  $P = mg$ , сила тертя по поверхні лотка  $F_{тр} = f \cdot N$  і нормальна реакція поверхні на тіло  $N$ . Лоток здійснює прямолінійні коливання під впливом комбінованого кінематичного віброзбуджувача[10]. Якщо до діючих сил додати силу інерції  $I$ , то для вивчення руху тіла можна використовувати рівняння статички (принцип Даламбера). Коливання лотка - гармонійне, і можна записати формули для визначення його переміщення  $S$ , швидкості  $V$  та прискорення  $a$ :

$$\begin{aligned} S(t) &= A \sin \omega t; \\ V &= A\omega \cos \omega t; \\ a &= -A\omega^2 \sin \omega t, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $A$  - амплітуда коливань;  $\omega$  - кутова частота коливань;  $A\omega$ ,  $A\omega^2$  - відповідно швидкість і прискорення вібропереміщення.

Розділимо рух тіла на дві ділянки: спільне з рухомою поверхнею лотка і вільний рух, яке називається «політ».

Рівняння руху тіла щодо віброуючого лотка на першій ділянці - умова рівноваги всіх сил, що діють на тіло:

$$m \ddot{x} = m A \omega^2 \sin \omega t \cos \beta - mg \sin \alpha + F_{тр}; \quad (6)$$

$$m \ddot{y} = m A \omega^2 \sin \omega t \sin \beta - mg \cos \alpha + N. \quad (7)$$



Тут  $F_{тр} = -fN$  при позитивному (вправо) напрямку руху тіла і  $F_{тр} = fN$  - при негативному (вліво) напрямку;  $f$  - коефіцієнт тертя.

Розділимо рівняння (6) на (7) і отримаємо максимальне прискорення лотка при заданих значеннях кутів  $\alpha$  і  $\beta$  і коефіцієнта тертя  $f$ :

$$a = g \frac{f \cos \alpha - \sin \alpha}{\cos \beta - f \sin \beta} \quad (8)$$

З рівняння (8) визначається гранично-допустиме значення прискорення лотка при безвідривному русі частинки. За експериментальними даними, відрив частинки відбувається при зменшенні швидкості руху лотка, тобто при негативному прискоренні. Отже, якщо прийняти  $a < 0$ , то з виразу (8) можливо визначити гранично допустимі значення кутів  $\alpha$  і  $\beta$ .

За експериментальними даними коефіцієнт тертя частинки по перфорованій поверхні з нержавіючої сталі лежить в межах  $f = 0,25 \dots 1,18$ . Якщо  $a > 0$ , то чисельник і знаменник рівняння (8) не можуть дорівнювати нулю, тобто:

$$\begin{aligned} f \cos \alpha - \sin \alpha > 0, \\ \cos \beta - f \sin \beta > 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Звідси отримуємо:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha < f, \\ \operatorname{tg} \beta < 1/f, \end{aligned}$$

або

$$\operatorname{tg} \alpha < f < \operatorname{ctg} \beta \quad (10)$$

Якщо прийняти коефіцієнт тертя ковзання спокою  $f_{\max} = 1,18$ , то отримаємо:  
 $\alpha < 49^\circ$ ,  $\beta < 41^\circ$ .

При  $f_{\min} = 0,25$  отримаємо:

$$\alpha < 15^\circ, \beta < 75^\circ.$$

Враховуючи, що найбільша дальність польоту частинки буде мати місце при його підкиданні під кутом  $45^\circ$  до горизонту (тобто  $\alpha + \beta = 45^\circ$ ), приймаємо  $\beta = 25 \dots 30^\circ$ , що має місце в експериментальній установці. З вище

$$\ddot{x} = \frac{-g \sin(\alpha \pm \varphi)}{\cos \varphi} + A\omega^2 \frac{\cos(\beta \mp \varphi)}{\cos \varphi} \sin \omega t, \quad (14)$$

де  $\varphi = \operatorname{arctg} f$  - кут тертя ковзання; верхні знаки відповідають руху тіла вправо, а нижні - вліво.

Відрив частинки від поверхні лотка відбувається в момент часу  $t = t_0$ , при якому значення нормальної реакції стає рівним  $N=0$ , і друга ділянка траєкторії визначається координатою:

$$S_0 = A \sin \omega t_0. \quad (15)$$

Умова відриву:

$$A\omega^2 \sin \omega t_0 \sin \beta = g \cos \alpha,$$

або

наведеного впливає, що кут нахилу лотка до горизонту  $\alpha$  в залежності від виду продукту, повинен бути в межах  $0 \dots 30^\circ$ . Попередні експериментальні дослідження показали, що цей кут становив від  $5$  до  $20^\circ$ .

З рівнянь (6) - (8) можна визначити мінімальне значення коефіцієнта тертя при заданих значеннях кутів  $\alpha$  і  $\beta$  та прискорення вібрації:

$$f \geq \frac{g \sin \alpha + a \cos \beta}{g \cos \alpha + a \sin \beta}. \quad (11)$$

Отже, можливо підібрати такі параметри вібропереміщення, при яких, по-перше, в площині лотка, яка займає місце нижче своєї статичної рівноваги і рухається вгору, здійснюється рух тіла (продукту) разом з нею без проковзування, а, по-друге, при положенні, яке займає рухлива площина лотка вище своєї статичної рівноваги, здійснюється відривний рух тіла. При цьому транспортується продукт, який потрапив на лоток, коли він займає своє крайнє нижнє положення, рухається разом з ним, набираючи запас кінетичної енергії. Оскільки при цьому прискорення тіла відносно поверхні лотка  $\ddot{y} = 0$ , то з рівняння (7) можна визначити нормальну реакцію:

$$N = mg \cos \alpha - mA\omega^2 \sin \omega t \sin \beta. \quad (12)$$

З виразу (12) видно, що рух продукту відбувається в площині лотка і не виходить за межі при умові:

$$\frac{A\omega^2 \sin \beta}{g \cos \alpha} \leq 1. \quad (13)$$

Якщо цей вираз дорівнює 1, нормальна реакція  $N$  перетворюється в нуль, а якщо ліва частина більше одиниці, тіло відривається від площини і здійснює політ.

При русі тіла в площині ( $\ddot{y} = 0$ ) його прискорення буде мати вигляд:

$$A_{KP} \omega_{KP}^2 = \frac{g \cos \alpha}{\sin \omega t_0 \sin \beta}. \quad (16)$$

З виразу (16) видно, що мінімальне критичне прискорення вібрації поверхні лотка, при якому відбудеться відрив тіла, буде при  $\sin \omega t_0 = 1$ , тобто при фазових кутах  $90^\circ$  і  $270^\circ$ . У ці моменти відносно критичне прискорення вібрації:

$$\frac{A_{KP} \omega_{KP}^2 \sin \beta}{g \cos \alpha} = 1. \quad (17)$$



Таким чином, для частинок, які піддаються вібраційному впливу, перехід їх до віброкиплячого шару залежить не від маси продукту, а від прискорення вібрації поверхні, на якій вони знаходяться.

Диференціальне рівняння вільного польоту частинки уздовж осі ОУ з рівняння (7) буде мати вигляд:

$$y = A \sin \beta \left[ (\sin \omega t_0 - \sin \omega t) + (\omega t - \omega t_0) \cos \omega t_0 - \frac{\sin \omega t_0}{2} (\omega t - \omega t_0)^2 \right], \quad (19)$$

де  $y$  - координата відносного переміщення тіла вздовж осі ОУ.

Щоб виконувалася прийнята схема руху тіла, приймемо умову:

$$(\sin \omega t_0 - \sin \omega t) + (\omega t - \omega t_0) \cos \omega t_0 - \frac{\sin \omega t_0}{2} (\omega t - \omega t_0)^2 > 0. \quad (20)$$

При  $t = \frac{3}{4} T$  вираз (20) прирівнюємо до нуля:

$$(\sin \omega t_0 + 1) + \left( \frac{3}{2} \pi - \omega t_0 \right) \cos \omega t_0 - \frac{\sin \omega t_0}{2} \left( \frac{3}{2} \pi - \omega t_0 \right)^2 = 0. \quad (21)$$

Рівняння (21) визначає параметр  $\omega t_0$ , при якому тіло в момент  $t = \frac{3}{4} T$  потрапляє на площину лотка АВ. Оскільки відрив може статися тільки в зоні, яка визначається положенням площини АВ вище своєї статичної рівноваги, то корінь рівняння (21) міститься в інтервалі  $0 < \omega t_0 < \pi/2$ .

Вирішуючи рівняння (21), отримуємо значення  $\omega t_0 = 0,6254$  [5, 12], яке показує, що час відриву тіла залежить тільки від величини кутової частоти  $\omega$ .

Визначимо величину абсолютного переміщення тіла повздовж лотка за один період коливання:

$$U_x = A (1 + \sin \omega t_0) \cos \beta + x_n, \quad (22)$$

яке при  $t = \frac{3}{4} T - t_0$  дасть шукану величину швидкості лотка  $\dot{S}$ . Середня швидкість транспортування тіла визначиться як:

$$V_{CP} = \frac{U}{T} = \left[ \frac{1 + \sin \omega t_0}{2\pi} + \left( \frac{3}{4} - \frac{\omega t_0}{2\pi} \right) \cos \omega t_0 \right] A \omega \cos \beta - \frac{1}{4\pi\omega} \left( \frac{3}{2} \pi - \omega t_0 \right)^2 g \sin \alpha. \quad (25)$$

В остаточному вигляді для розглянутого режиму отримаємо:

$$V_{CP} = 0,7797 A \omega \cos \beta - 1,329 g \frac{\sin \alpha}{\omega}. \quad (26)$$

З формули (26) з точністю числових множників до двох знаків можливо отримати такі формули для визначення середньої швидкості вібротранспортування [8, 9]:

$$\ddot{y} = A \omega^2 \sin \omega t_0 \sin \beta - g \cos \alpha. \quad (18)$$

Інтегруючи це рівняння і визначаючи постійні інтегрування з умов:

$$y(t_0) = 0 \text{ и } \dot{y}(t_0) = 0,$$

отримаємо:

$$t_0 < t < \frac{3}{4} T,$$

де  $T = 2\pi / \omega$  - період вібрації, або, на основі формули (19):

де перший доданок визначає величину переносу робочим органом продукту без проковзування до моменту відриву, а друге - величину вільного польоту частинки вздовж напрямку робочого органу.

Помістивши початок рухомої системи координат в точку  $O_1$ , де відбувається відрив частинки від лотка, отримаємо диференціальне рівняння руху тіла:

$$\ddot{x} = -g \sin \alpha, \quad (23)$$

Інтегруючи це рівняння і визначаючи постійні інтегрування з умов:

$$x(0) = 0;$$

$$\dot{x}(0) = A \omega \cos \omega t_0 \cos \beta,$$

отримаємо співвідношення:

$$x(0) = A \omega \cos \omega t_0 \cos \beta \cdot t - \frac{gt^2}{2} \sin \alpha, \quad (24)$$

$$V_{CP} = 0,78 A \omega \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \alpha}, \quad (27)$$

$$V_{CP} = 1,3 \frac{g}{\omega} \cdot \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\sin \beta}. \quad (28)$$

Аналіз виразів (27) та (28) показує, що коли  $\alpha + \beta \rightarrow \pi / 2$ , то  $V_{CP} \rightarrow 0$ , а швидкість транспортування можна різко збільшити за



рахунок зменшення кута  $\beta$ . Відзначимо, що в цих формулах не враховано відносно проковзування частинок по поверхні лотка на ділянці  $0 \dots t_0$ . Як показують експериментальні дослідження, відносним переміщенням продукту по лотку при даному режимі можна знехтувати. При синхронному переміщенні всіх частинок продукту за вказаною траєкторією величина  $V_{cp}$  характеризує швидкість вібраційного транспортування по лотку - один з важливих параметрів процесу сепарації сипкої продукції. На практиці така синхронність не може бути досягнута з абсолютною точністю, проте близькі до неї умови можуть бути реалізовані.

Продуктивність машини визначається рівнянням:

$$Q = \psi \rho S V_{cp}, \quad (29)$$

де  $\psi$  - коефіцієнт заповнення лотка продуктом;  $\rho$  - насипна щільність продукту,  $\text{кг/м}^3$ ;  $S$  - площа поперечного перерізу лотка (продукту),  $\text{м}^2$ .

Для ілюстрації використання отриманих формул розглянемо результати експериментальних досліджень. Відповідно певним раціональним режимам сепарації маємо: кути нахилу робочої поверхні  $\alpha_1 = 25^\circ$ ,  $\alpha_2 = 20^\circ$ ,  $\alpha_3 = 15^\circ$ ,  $\alpha_4 = 10^\circ$ ,  $\alpha_5 = 5^\circ$ ; частота коливань платформи  $\omega = 140 \text{ с}^{-1}$ ; амплітуда коливань  $A = 2,5 \text{ мм}$ ; продуктивність  $Q = 0,2 \text{ кг/с}$ . Так, наприклад, для останнього лотка швидкість транспортування при  $\beta = 30^\circ$  становить, відповідно до формули (28):

$$V_{cp} = 1,3 \cdot \frac{9,8 \cdot \cos(25 + 30)}{140 \cdot \sin 30^\circ} = 0,1 \text{ м/с}.$$

Продуктивність визначимо за формулою (29), де  $\psi$  з експериментальних досліджень можна прийняти  $\psi = 0,5$ ;  $S$  - площа поперечного перерізу робочого органу,  $\text{м}^2$ .

Для експериментальної установки отримаємо:

$$Q = 0,5 \cdot 1050 \cdot (0,04 \cdot 0,15) \cdot 0,1 = 0,3 \text{ кг/с}.$$

Як впливає з обчислень, теоретична продуктивність установки для сепарації в 1,5 рази перевищує отриману експериментальним шляхом. При цьому необхідно зазначити, що в теоретичних викладках не враховано сили адгезії, а також зменшення коефіцієнта тертя та ковзання частинок по лотку при віброкидках. Облік цих сил природно призведе до зниження швидкості вібротранспортування, а отже, до зниження продуктивності установки.

Для створення гармонічних коливань робочого органу вібраційного сепаратора застосовуємо комбінований кінематичний привод [10].

У всіх теоретичних роботах вібраційні машини розглядаються як системи, що здійснюють вимушені коливання під дією збурюючої сили, що не залежить від коливань

веденого робочого органу, тобто лотка, рух якого забезпечує виконання корисної механічної роботи.

Приймається, що зміни вимушених коливань залежить тільки від часу [12]. Але сила енергії дебалансов буде залежати не тільки від прискорення відносного (обертального) руху, але і від прискорення переносного (поступального) руху, тобто збурююча сила залежить від створеного нею руху.

Визначити заздалегідь цю залежність не представляється можливим, тому що ніхто не знає закон руху веденої ланки.

Механізм поведінки сипучого шару матеріалу під дією механічних коливань (вібрацій) можна представити в такий спосіб. Під дією механічних коливань в шарі матеріалу поширюються хвилі деформації. Моношар, що входить в контакт з джерелом вібрації (наприклад, віброуючої поверхнею), отримує від нього силові імпульси. Від нижнього моношару імпульси передаються лежачим вище моношаром. Внаслідок інерційності, наявності сил тертя і незворотних деформацій імпульси у міру передачі їх від моношару до іншого моношару поступово слабшають. У режимі з підкиданням [7] з плином часу нижній моношар, передавши всю свою кінетичну енергію лежачим вище шарам, почне зворотний рух, хоча верхні моношарів можуть продовжувати переміщатися вгору. У цей момент починається розпушення сипучого матеріалу. У просторі між поверхнею робочого органу і нижнім моношаром сипучого матеріалу при підкиданні виникає розрідження, а при падінні - підвищення тиску щодо атмосферного. Порівняння цих періодичних коливань тиску досягається внаслідок періодичного відтоку надлишкового та припливу потрібної кількості повітря, що проходить через пори, наявні в шарі сипучого матеріалу. Тому на частинки матеріалу діє пульсуючий аеродинамічний натиск, спрямований з деяким зрушенням по фазі в основному в бік, протилежний їх переміщенню.

#### Висновок.

1. Виконано математичне моделювання вібраційного транспортування сипкої продукції на вібраційному сепараторі. Отримана формула визначення швидкості вібротранспортування

$$v = 0,78 A \omega \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \alpha}$$

Визначено максимальні кути напрямків коливань і кути нахилу робочої поверхні до горизонту в залежності від виду оброблюваного продукту.



2. Для створення гармонічних коливань робочого органу вібраційного сепаратора пропонується комбінований кінематичний привод.

#### Список використаних джерел

1. Гончаревич И.Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И. Ф. Гончаревич, К. В. Фролов. – М.: Наука, 1981. – 320 с
2. Блехман И.И. Вибрационное перемещение /И. И. Блехман, Г. Ю. Джанелидзе. – М.: Наука, 1964. – 410с.
3. Ганиев Г. Е., Украинский Л. Е. Динамика частиц при воздействии вибрации / Г. Е. Ганиев, Л. Е. Украинский. – К.: Наукова думка, 1975. - 147с.
4. Ловейкін В. С. Аналіз та оптимізація режимів руху зернової частинки вповодж віброуючого похилого решета / В. С. Ловейкін, Ю. В. Човнюк, В. П. Кулик // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка і енергетика в АПК». – 2012. – Вип. 170, Ч. 1. – С. 277–286.
5. Гортинский В. В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / Гортинский В. В., Демской А. В., Борискин М. А. – М.: Колос, 1980. – 304 с.
6. Заика П. М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах / П. М. Заика. – К.: УСХА, 1999. – 626 с.
7. Кармазин В. Д. Техника и применение вибрирующего слоя / В. Д. Кармазин. – К.: Наукова думка, 1977. – 175 с.
8. Быков В. С. Определение скорости виброперемещения сыпучего материала / Быков В. С. // Техника в сельском хозяйстве. – 2000. – № 2. – С. 21-23.
9. Котов Б. І. Механіко-математична модель руху твердої частинки у віброзрідженому шарі зерна / Котов Б. І., Степаненко С. П. // Кіровоградський національний технічний університет. Зб. наук. праць. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2004. – Вип. 15. – С. 433–437.
10. Паламарчук І. П. Розвиток конструктивних схем сепараторів сипучої продукції з вібровідцентровим приводом технологічного руху / І. П. Паламарчук, В. М. Бандура, О. М. Омелянов// Вібрації в техніці та технологіях.– 2001.– №3(19). – С. 80-86.
11. Котов Б. І. До теорії інтенсифікації просіювання зернових матеріалів у віборешітних сепараторах / Б. І. Котов, А. В. Спирін., С. П. Степаненко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2017.– № 2(85). – С. 9-15.
12. Вібрації в техніці: Справочник. В 6-ти т. Т.4. Вибрационные процессы и машины /

Под ред. Э. Э. Лавендела. - М.: Машиностроение, 1981. - 509с.

#### References

1. Goncharevich, I.F. (1981). *Teoriya vibratsionnoye tehniki i tehnologii [The theory of vibration technique and technology]* Moskva: Nauka [in Russian]
2. Blekhman I.I. Blekhman I. I., Dzhanelidze G. Yu. (1964). *Vibracionnoe peremeshchenie [Vbrazil peremen]* [in Russian].
3. Ganiev G. E., Ukrainskij L. E. Ganiev G. E. (1975) *Dinamika chastic pri vozdeystvii vibracii [Particle dynamics under vibration]* [in Russian]
4. Loveiken, V.S., Chovnyk, Yu.V., Kulyk V.P. (2012)., *Analiz ta optimizaciya rezhimiv ruhu zernovoi chastinki vpodovzh vibruyuchogo pohilogo resheta [Analysis and optimization of grain particle motion modes along an inclined vibrating sieve]* [in Ukrainian].
5. Gortinskij V. V. (1980) *Processy separirovaniya na zernopererabatyvayushchih predpriyatiyah [Separation processes at grain processing plants]* [in Russian]
6. Zaika P. M. (1999) *Vibracionnoe peremeshchenie tverdyh i sypuchih tel v sel's'kohozyajstvennyh mashinah [Vibratory movement of solid and granular materials in agricultural machines]* [in Russian]
7. Karmazin V. D. (1977) *Technique and application of vibrating layer [Technique and application of vibrating layer]* [in Russian]
8. Bykov V. S. (2000) *Opredelenie skorosti vibroperemeshcheniya sypuchego materiala [Determination of the velocity of displacement of the granular material]* [in Russian]
9. Kotov B. I. *Mekhaniko-matematichna model' ruhu tverdoi chastinki u vibrozridzhenomu shari zerna [Mechanical and mathematical model of motion of a solid particle in a vibro-discharged layer of grain]* [in Ukrainian]
10. Palamarchuk, I.P., Bandura, V.M., Omelyanov O.M. (2001). *Rozvytok konstruktyvnykh skhem separatoriv sypuchoi produktzii z vibrovidtzentrovym pryvodom tekhnologichnoho rukhu [Development of structural schemes of bulk product separators with vibration center drive technology].* *Vibracii v tekhnike i tekhnologiyah - Vibrations in engineering and technology*, 3, 80-86 [in Ukrainian].
11. Kotov, B.I., Spirin, A.V., Stepanenko, S.P. (2017). *Do teoriiy intensyfikatsiyyi prosiyuvannya zernovykh materialiv u vibroreshitnyh separatorah [The theory of intensification of sifting of grain materials in vibration separators].* *Vibracii v tekhnike i*



*tehnologiyah - Vibrations in engineering and technology*, 2, 9-15 [in Ukrainian].

12. *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik*. V 6-tit. / Red. soviet: V.N. Chelomey (pred.) I dr. // M.: Mashinostroyeniye, 1981. – T. 4. *Vibratsionnyye protsessy i mashiny / Pod red. E.E. Lavendela*, 1981. – 509 s [in Russian].

#### **ОБОСНОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ПРОЦЕСС ОБРАБОТКИ СЫПУЧЕЙ МАССЫ**

*В статье представлены математическое описание процесса вибрационной обработки сыпучего сырья. Вибрационная машина рассматривается как система, осуществляющая вынужденные колебания под действием возмущающей силы, не зависящей от колебаний ведомого рабочего органа. На основе результатов изучения влияния механических колебаний на процесс сепарации сыпучей продукции делается попытка наметить подход к*

*решению задач теории влияния механических колебаний на технологические процессы.*

**Ключевые слова:** *вибротранспортирование, механические колебания, сепарация, сыпучий материал.*

#### **THE BASIS OF THE EFFECTS OF MECHANICAL EXPLOSIVES ON THE PROCESS OF MASS SUGAR PROCESSING**

*The article presents a mathematical description of the process of vibration processing of bulk raw materials. The vibration machine is considered as a system that performs forced oscillations under the action of a disturbing force that does not depend on the oscillations of the operating body. On the basis of the results of the study of the influence of mechanical vibrations on the process of separation of bulk products, an attempt is made to outline an approach to solving the problems of the theory of the influence of mechanical vibrations on technological processes.*

**Keywords:** *vibration transport, mechanical vibrations, separation, loose material.*

#### **Відомості про авторів**

**Омельянов Олег Миколайович** – асистент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету. Службова адреса: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ 21008

**Омельянов Олег Николаевич** – асистент кафедри общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета. Служебный адрес: г. Винница, ул. Солнечная 3, ВНАУ 21008

**Omelyanov Oleg Mykolaovich** – Assistant of the Department of General Technical Disciplines and Occupational Safety of Vinnitsa National Agrarian University, service address: Vinnitsa st. Sonyachna 3, VNAU 21008