

The article considers a mathematical model for determining the operational indicators of a machine-tractor unit, for determining a rational fleet of farm machines that ensures the performance of work with minimal operating costs and in optimal agrotechnical terms.

The structure of operating costs during the cultivation of agricultural crops using different technologies was obtained. Patterns of changes in operational costs for growing crops using No-till and Strip-till technologies.

The application of these regularities makes it possible to obtain predictive values of the efficiency of the use of the farm's machine-tractor park even at the planning stage.

The choice of technical means must be carried out taking into account the requirements of agricultural techniques for growing agricultural crops, zonal soil and climatic conditions and the condition of the fields. To ensure the performance of works with minimal operating costs, it is necessary to equip the machine and tractor park with technical means that ensure high-quality performance of works in optimal agrotechnical terms. It was established that in the structure of the total operational costs for growing agricultural crops using intensive technology, about 55...66% are the costs of technological materials used during the cultivation of agricultural crops. The developed mathematical model for determining the performance indicators of the MTA makes it possible to obtain predictive values of the efficiency of the use of the farm's machine-tractor fleet even at the planning stage.

**technical means, planning of mechanized works, equipment of the machine and tractor park**

*Одержано (Received) 19.10.2022*

*Прорецензовано (Reviewed) 02.11.2022*

*Прийнято до друку (Approved) 26.12.2022*

**УДК 631.632.3**

**DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.55-65>**

**Б. І. Котов**, проф., д-р техн. наук

*Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна*

**С. П. Степаненко**, ст. наук. співр., д-р техн. наук

*Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва, смт Глеваха, Україна*

*e-mail: [stepanenko\\_s@ukr.net](mailto:stepanenko_s@ukr.net)*

**Р. А. Калініченко**, доц., канд. техн. наук

*ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», м. Ніжин, Україна*

## Теоретичне дослідження поділу насінневого матеріалу за густиною зернівок конічною вібропневмоцентрифугою

В статті розглядаються дослідження поділу насінневого матеріалу за густиною зернівок конічною вібропневмоцентрифугою з врахуванням розподілу швидкості повітря в поперечному перетині аспіраційного каналу, для визначення раціональної форми та параметрів робочих органів конічної вібропневмоцентрифуги, а також технологічних показників роботи машини: подачі, витрат, ефективності поділу насінневого матеріалу на фракції. Науковими дослідженнями сформульовано вдосконалені математичні моделі переміщення зернівки у вібропневмоцентрифужному шарі конічної вібровідцентрованої центрифуги, які враховують зміну дії відцентрової сили в залежності від координати зернівки за висотою конуса, що дозволяють з різним ступенем точності визначити параметри руху. Обґрунтовано, що при використанні конічної опорної поверхні вібровідцентрованої центрифуги товщина перемішуючого шару зерна збільшується в напрямку руху і можна теоретичними розрахунками визначити раціональні геометричні та кінематичні параметри ротора, які забезпечують якісний поділ насінневого матеріалу за густиною.

Отримані системи нелінійних диференційних рівнянь із початковими умовами розв'язано в програмному середовищі MathCad у вигляді траєкторій руху зернівки в повітряному потоці, що дозволяє розраховувати та встановити тенденції їх траєкторій руху, які різняться коефіцієнтами парусності та визначити раціональні значення параметрів конічної вібропневмоцентрифуги.

**насінневий матеріал, густина, зернівка, конічна вібропневмоцентрифуга, потік повітря, процес поділу**

**Постановка проблеми.** На сучасному етапі розвитку сільськогосподарського машинобудування, одним із резервів підвищення якості або ефективності технічних засобів для підготовки насінневого матеріалу до висіву є використання існуючої елементної бази промислових вібровідцентрових зерносеparatorів із вдосконаленими віброротаційними робочими органами, які здатні замінити пневмосортувальні столи.

Ефективність процесу поділу насінневого матеріалу за густиною зернівок [1, 4-6, 15-22] на циліндричних безпровальних решетах визначається переважно двома факторами: інтенсивністю переміщення «важких» частинок (зернівок) у радіальному напрямку під дією відцентрової сили та швидкістю переміщення шару матеріалу вздовж твірної циліндра в напрямку вивантаження під дією сил тяжіння та інерції коливального руху решета. При збільшенні частоти коливань інтенсифікується розпушування шару і «важкі» зернівки швидше досягають поверхні решета [2, 13-15, 17] тобто процес сегрегації інтенсифікується [1, 10, 20-22]. Але при цьому збільшується швидкість переміщення шару насінневого матеріалу до вивантаження і певна кількість «важких» зернівок виноситься у збірник «легкої» фракції в наслідок чого ефективність поділу знижується [1, 2, 4, 6, 8]. Збільшення кутової швидкості обертання ротора призводить до зависання шару матеріалу на решеті.

Часткового зменшення швидкості переміщення шару матеріалу з одночасною інтенсифікацією розпушення шару можна досягти використанням безпровального решета у формі усіченого конуса з меншим нижнім діаметром [17].

Для оцінки ефективності використання конічної віброцентрифуги для поділу компонентів зернового матеріалу необхідно провести теоретичний аналіз.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз функціонування зерносеparatorуючих машин, що використовують пневмовіброзрідження зернових матеріалів проведений у фундаментальних роботах [1, 2] та приводить до висновку, що можливості подальшого вдосконалення пневмосортувальних столів практично вичерпано і подальше збільшення продуктивності процесів поділу насінневого матеріалу пов'язано з використанням машин вібровідцентрової дії. При цьому в роботах [3, 4, 5] доведено доцільність використання в якості робочих органів циліндричних віброрешіт. В подальших дослідженнях [5, 6, 7] виявлено недоліки циліндричних решіт і обґрунтовано доцільність використання каскадних конічних решіт, ефективність яких теоретично та експериментально обґрунтована в роботі [5]. Математичні моделі, які описують процеси вібровідцентрової сепарації наведено в роботах [7-9] але вони обмежуються розглядом процесів переміщення зернівки по конічній поверхні, яка обертається навколо вертикальної вісі і здійснює коливання у вертикальній площині, крім того внутрішньо шарові процеси не розглянуто. Слід зауважити, що при математичному описі не враховується зміна радіальної координати за висотою конуса. Переміщення зернівки у вібровідцентровому зрідженому шарі розглянуто теоретично в роботах [4, 10, 11]. Але зміна радіальної координати руху зернівки за висотою конуса, як в середині шара так і по її поверхні в математичному описі не враховано.

Таким чином є необхідність уточнити модельні уявлення про процеси поділу насінневого матеріалу при використанні конічних обертально-вібраційних поверхонь.

**Постановка завдання.** Уточнити фізико-механічний перебіг процесу і математичні моделі для розрахунку процесів переміщення зернівки в шарі і по поверхні в конічній вібровідцентровій центрифугі.

**Виклад основного матеріалу.** Технологія сортування насіння за густиною, як найважливішим показником якості, передбачає попереднє очищення і сортування за розміром на решетах і трієрах та остаточний поділ в конічній вібровідцентровій центрифугі.

В загальному вигляді процес вібропневматичної сепарації насінневих матеріалів на поверхні конічної центрифуги можна розглядати або уявити, як перебіг розшарування насіння у рухомому псевдозрідженому шарі, тобто перерозподіл насіння за висотою (товщиною) шару під дією вібрацій, повітряного потоку та відцентрової сили. При цьому «легкі» насінини, які мають густину нижче середньої, «спливають» до відкритої поверхні, а «важкі» насінини занурюються вглиб насінневого шару до опорної поверхні ротора центрифуги. Ансамбль зернівок, які мають «середню» за об'ємом шару густину називають середовищем або постіллю. Параметри коливань і стану постілі вважаються постійними в часі. Розшарування коливного псевдозрідженого шару насінневого матеріалу та його переміщення вздовж опорної конічної поверхні відбуваються одночасно.

Інтенсивність переміщення зернівок у псевдозрідженому шарі спостерігається у зв'язку із розпушеністю шару насінневого матеріалу, тобто збільшується взаємне переміщення зернівок за товщиною шару. Швидкість переміщення шару по опорній поверхні залежить від частоти коливань конічної поверхні, яка в конічній вібровідцентровій центрифугі інтенсифікує розпушення шару насінневого матеріалу за рахунок часткових радіальних переміщень насіння за товщиною матеріалу.

Це пояснюється тим, що при переміщенні насінини матеріалу під дією сили інерції  $I$  та сили тяжіння  $G$  безпосередньо по опорній поверхні оберненого усіченого конуса рис. 1, зміщується не тільки вздовж вертикальної вісі конуса, але й ще на певні відстані в бік вісі та від неї.

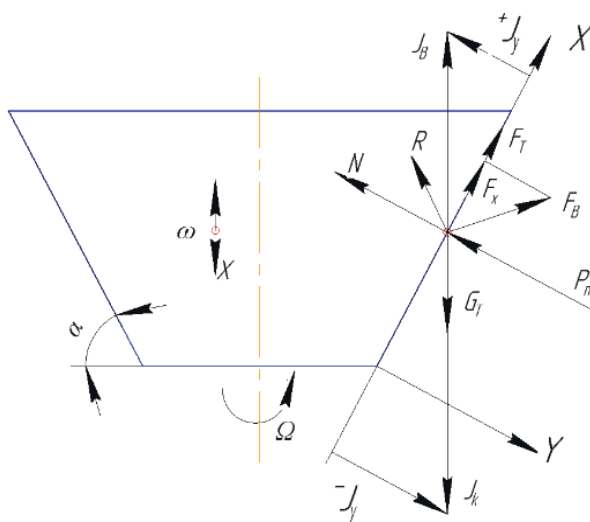


Рисунок 1 – Схема дії сил на зернівку, яка переміщується по поверхні конічної вібровідцентровій центрифуги

Джерело: розроблено авторами з використанням [1, 4, 9, 17]

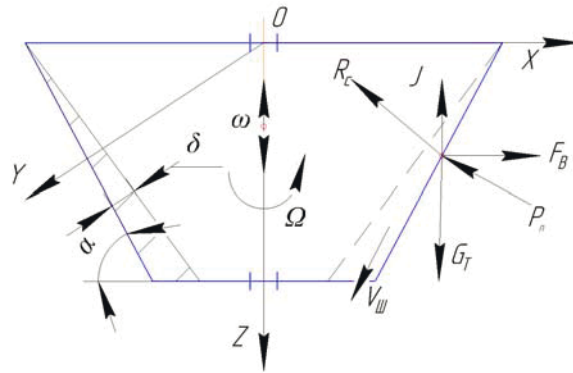


Рисунок 2 – Схема сил, що діють на зернівку у вібропневмозрідженому шарі в полі відцентрових і гравітаційних сил

Джерело: розроблено авторами з використанням [1, 4, 9, 17]

При такому переміщенні зернівки їй чинить опір додаткова складова відцентрової сили інерції  $F_B$  спрямованої вздовж поверхні в результаті чого швидкість зернівки  $V_T$  стає меншою за середню швидкість шару насінневого матеріалу. Крім того на зернівку діють складові сили інерції  $I_{xy}$  переносного руху конуса при його русі «вверх – вниз» у вертикальній площині.

Для визначення параметрів внутрішньо шарового руху зернівки з урахуванням наведеної вище фізичної моделі процесу [4, 10, 11, 17, 20-22] доцільно використовувати детерміновану математичну модель вібраційного сепарування сипких матеріалів, яка при використанні додаткового повітряного потоку (спрямованого нормально до опорної коливної поверхні) та відцентрової сили (від обертового руху) може бути записана у вигляді диференціального рівняння:

$$m_1 \cdot \ddot{\bar{v}} = m_0 \cdot (\Delta - 1) \cdot (\bar{g} - \dot{u}) + \bar{R}(v) + m_0 \cdot (\Delta - 1) \cdot \bar{F}_B + \bar{F}_P(V_P), \quad (1)$$

де  $\bar{v}$  – швидкість зернівки відносно середовища;

$\bar{u}$  – абсолютна швидкість середовища в точці співпадаючій з центром тяжіння зернівки (швидкість переносного руху);

$m_1$  – маса зернівки;

$m_0$  – маса середовища в об’ємі зернівки;

$$\Delta = \frac{m_1}{m_0} = \frac{\rho_1}{\rho_0},$$

$\rho_1, \rho_0$  – густина зернівки і середовища відповідно;

$\bar{g}$  – прискорення сили тяжіння;

$\bar{R}(v)$  – сила з якою середовище діє на зернівку (сила опору середовища);

$\bar{F}_B$  – відцентрова сила;

$\bar{F}_P$  – сила тиску повітряного потоку.

Рух шару насінневого матеріалу по поверхні конуса, який обертається навколо вертикальної вісі та здійснює гармонічні поступальні коливання вздовж вертикальної вісі симетрії, які узагальнено законом -  $A \cdot \sin(\omega \cdot t)$ , де  $A$  – амплітуда коливань;  $\omega$  – частота коливань поверхні конуса; моделюється переміщенням матеріальної частки по поверхні конуса, параметри якого описуються диференціальним рівнянням у векторній формі відповідно до рис. 1.

$$m_1 \cdot \ddot{\bar{v}} = \bar{G} + \bar{F}_T + \bar{I} + \bar{R}(v) + \bar{F}_B + \bar{F}_P(V_P) + \bar{N}, \quad (2)$$

де  $\bar{F}_T$  – сила тертя;

$\bar{N}$  – нормальна реакція поверхні.

Основною особливістю конічної вібровідцентрової центрифуги чим вона відрізняється від циліндричної робочої поверхні є зміна (зменшення) площі опорної поверхні в напрямку руху (вивантаження) матеріалу та зменшення радіуса поверхні.

Ці особливості в попередніх дослідженнях не враховувались, але вони суттєво впливають на процес поділу так, як зумовлюють збільшення товщини шару  $\delta$  насінневого матеріалу на поверхні конусної частини в напрямку його руху.

Визначимо сили, що діють на насінину при її переміщенні у вібропневмозрідженому шарі:

$$\text{Сила ваги } \bar{G} = m_1 \cdot g;$$

$$\text{Виштовхуюча сила } \bar{G}_a = m_0 \cdot g;$$

$$\text{Відцентрова сила у зрідженому шарі } \bar{F}_B = (m_1 - m_0) \cdot r(z) \cdot \Omega^2;$$

$$\text{Сила інерції у віброзрідженому шарі } \bar{I} = (m_1 - m_0) \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t);$$

$$\text{Сила опору середовища } R_c = \bar{R}(v);$$

$$\text{Сила тиску повітряного потоку } \bar{F}_P(V_p) = k_0 \cdot V_p^2;$$

$V_p$  – швидкість повітря;

$k_0$  – коефіцієнт опору.

Проектуючи рівняння (2) на осі прямокутних координат OXYZ та враховуючи те, що радіальне переміщення зернівки залежить від висоти конуса:

$$r(z) = R_0 - z \cdot \tan \theta,$$

де  $R_0$  – більший радіус усіченого конуса,

$\theta$  – кут розкриття конуса; отримаємо систему диференціальних рівнянь в координатній формі:

$$\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2, \quad (3)$$

де  $m_2 = m_1 - m_0$ ;

$R_c$  – в даному випадку сила опору в напрямку зворотному переміщенню подібна силі в'язкого тертя [4];  $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ ;  $\dot{y} = \frac{dy}{dt}$ ;  $\dot{z} = \frac{dz}{dt}$ ;  $\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$ ;  $\ddot{y} = \frac{d^2y}{dt^2}$ ;  $\ddot{z} = \frac{d^2z}{dt^2}$ .

Враховуючи силу опору середовища  $R_c$ , як силу в'язкого тертя [ ]:

$$R_c = k_c \cdot \bar{V}. \quad (4)$$

Тоді систему рівнянь (3) можна привести до системи лінійних диференціальних рівнянь в наступному вигляді:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x} = m_2 \cdot [R_0 - z \cdot \tan \theta] \cdot \Omega^2 - k_{cx} \cdot \dot{x} + 2 \cdot m_2 \cdot \Omega \cdot \dot{y} - k_0 \cdot V_p^2; \\ m_1 \cdot \ddot{y} = m_2 \cdot [R_0 - z \cdot \tan \theta] \cdot \Omega^2 - k_{cy} \cdot \dot{y} - 2 \cdot m_2 \cdot \Omega \cdot \dot{x} - k_0 \cdot V_p^2; \\ m_1 \cdot \ddot{z} = m_2 \cdot g - k_{cz} \cdot \dot{z} - m_2 \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t); \end{cases} \quad (5)$$

За початкових умов:  $t = 0$ ;  $z = 0$ ;  $x = x_0 = R_0 - \delta$ ;  $y = y_0 = R_0 - \delta$ ;

$\frac{dx}{dt} = \frac{dy}{dt} = \frac{dz}{dt} = 0$ ;  $\delta$  – товщина шару насіння.

На рис. 3 наведено зміну параметрів процесу переміщення зернівки у вібропневмозрідженому кільцевому конічному шарі насінневого матеріалу в часі (в полі відцентрових сил).

Якщо, наприклад, знехтувати дією сили Коріоліса за її незначним скалярним значенням [9] то система рівнянь (5) спрощується і процес переміщення зернівки в шарі можна описати системою двох диференціальних рівнянь, які мають аналітичний розв'язок:

$$\begin{cases} A_1 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + B_1 \cdot \frac{dx}{dt} - C_1 \cdot z = D_1; \\ A_2 \cdot \frac{d^2z}{dt^2} + B_2 \cdot \frac{dz}{dt} = D_2 - F_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) \end{cases} \quad (6)$$

де  $A_1 = m_1$ ;  $A_2 = m_2$ ;  $B_1 = k_{cx}$ ;  $B_2 = k_{cz}$ ;  $D_1 = m_2 \cdot R_0 \cdot \Omega^2 - k_c \cdot V_s^2$ ;  $D_2 = m_2 \cdot g$ ;  $F_1 = m_2 \cdot A \cdot \omega^2$ ;  $C_1 = \tan \theta$ .

$$k_{cx,y} = 0,6 \cdot \pi \cdot [0,5 \cdot d_s]^3 \cdot f_1 \cdot \rho_n \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot g \cdot (1 + 0,12 \cdot f_1) \cdot k_u, \quad (7)$$

де  $d_s$  – еквівалентний діаметр зернівки;

$f_1$  – коефіцієнт внутрішнього тертя;

$\rho_n$  – насипна щільність шару насіння;

$\varepsilon$  – порозність (шпаруватість) шару;

$k_u$  – коефіцієнт ущільнення шару насіння.

Оскільки в процесі переміщення псевдозрідженого шару вздовж коливної кінчної поверхні відбувається зменшення її площі із одночасним зменшенням дії відцентрової сили  $F_B = m_2 \cdot R_0 \cdot \Omega^2$ , то товщина шару насінневого матеріалу буде збільшуватись в напрямку її руху (в напрямку вивантаження).

Товщина шару дисперсного матеріалу визначається на основі рівняння нерозривності:

$$Q = F_p \cdot V_s = 2 \cdot \pi \cdot r(z) \cdot \delta \cdot \rho_n \cdot V_s. \quad (8)$$

Звідки товщина шару визначиться залежністю:

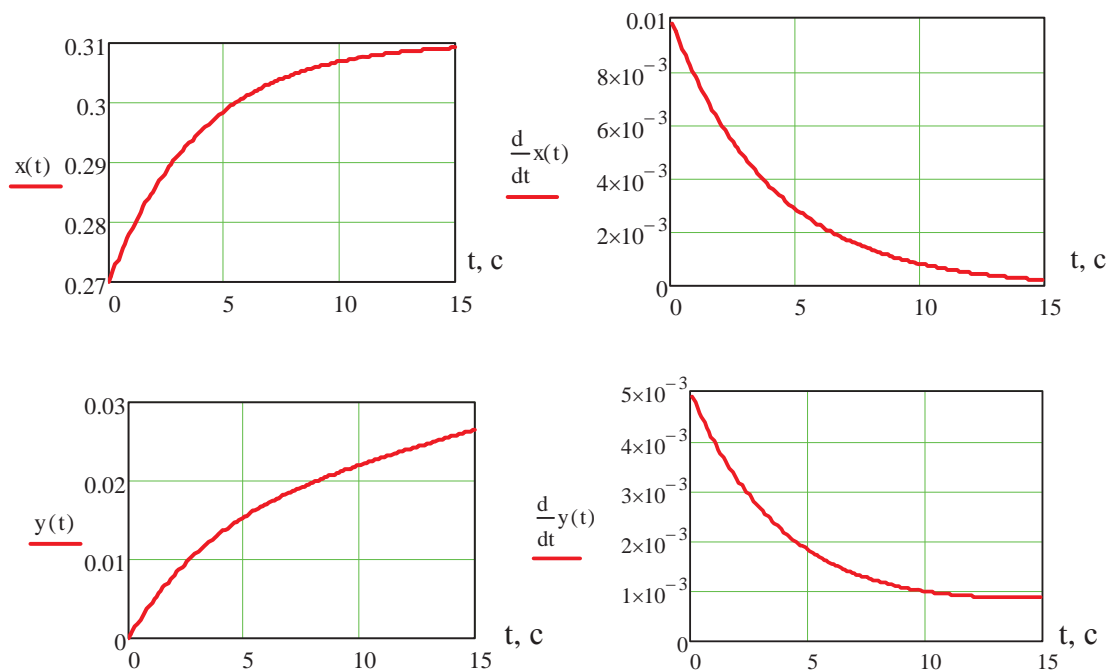
$$\delta = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r(z) \cdot \rho_n \cdot V_s}, \quad (9)$$

де  $F_p$  – площа перетину насінневого шару;

$V_s$  – швидкість руху шару матеріалу;

$r(z)$  – поточне значення радіуса ротора.

Для визначення швидкості переміщення шару матеріалу по обертовій коливній поверхні, згідно рівняння (5), використано традиційний підхід [9-11] представлення рухомого шару насіння, плоскою частинкою масою  $m$ , як показано на рис. 3.



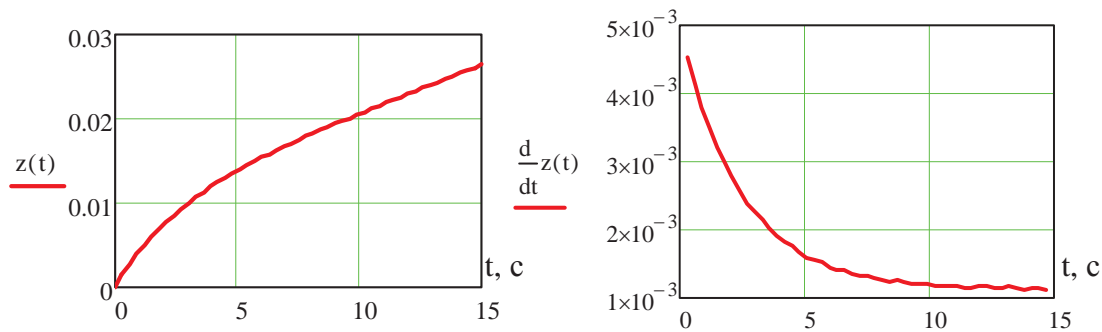


Рисунок 3 – Траєкторії переміщення шару та швидкості переміщення шару матеріалу по обертовій коливній поверхні

Джерело: розроблено авторами

Проектуючи рівняння (2) на прямокутні вісі рухомої системи координат рис. 2 і розкриваючи значення діючих на зернівку сил, диференціальні рівняння можна записати в такому вигляді:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} = m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\alpha) - m \cdot g \cdot \sin(\alpha) + f \cdot N + m \cdot r(z) \cdot \Omega^2 \cdot \cos(\alpha) + k_0 \cdot V_p^2; \\ m \cdot \ddot{y} = m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\alpha) - m \cdot g \cdot \cos(\alpha) + N - m \cdot r(z) \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\alpha) - k_0 \cdot V_p^2; \end{cases} \quad (10)$$

Умови безвідриного руху зернівки по поверхні ( $x \neq 0; y = 0; N > 0$ ):

$$\frac{A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha)}{g \cdot \cos(\alpha) + r(z) \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\alpha)} \leq 1. \quad (11)$$

Для регулярного безвідриного руху зернівки із миттєвими зупинками в кожному напрямку (вверх-вниз) в роботі [9] отримані розрахункові співвідношення, які дозволяють визначити середню швидкість переміщення зернівки за один період коливань  $T = \omega^{-1}$ .

$$\begin{aligned} V_{cp} &= \frac{S_+ + S_-}{2 \cdot \pi} \omega; \\ S_- &= 2 \cdot A \cdot \frac{\cos(90 - \alpha + \varphi)}{\cos \varphi} \left( 1 + \frac{\pi - \varepsilon}{\tan \varepsilon} \right) \sqrt{(\sin \varepsilon)^2 - (\varepsilon \cdot z_+)^2}; \\ S_+ &= 2 \cdot A \cdot \frac{\cos(90 - \alpha + \varphi)}{\cos \varphi} \left( 1 + \frac{\pi}{\tan \varepsilon} \right) \sqrt{(\sin \varepsilon)^2 - (\varepsilon \cdot z_+)^2}; \\ \varepsilon &= \pi \frac{v}{v - 1}; \quad v = \frac{z_-}{z_+}; \quad z_+ = \frac{g}{A \cdot \omega^2} \left[ 1 - \frac{r(z) \cdot \Omega^2}{g} \cot(\alpha \pm \varphi) \right] \\ \varphi &= \tan^{-1} f \text{ – кут тертя; } r(z) = r(h) = R_0(1 - h \cdot \tan \theta). \end{aligned} \quad (12)$$

За формулами (12) визначено середню швидкість руху зернівки по поверхні конуса з кутом розкриття  $\theta$  для різних значень  $r(h)$ , де  $h$  – координата за висотою конуса і результати розрахунків представлено графіком залежностей  $V_{cp} = f_1\left(k_r = \frac{r(h) \cdot \Omega^2}{g}\right)$  та  $V_{cp} = f_2(r(h))$ , як наведено на рис. 4.

А за рівнянням (9) визначена залежність зміни товщини шару за висотою опорної конічної поверхні (рис. 5).

Збільшення товщини шару в місці вивантаження розшарованого матеріалу має певні переваги, так як більш «високий» шар зернового матеріалу в якому зернівки різної густини розподілені за висотою, легше розділити механічно ножевими [2] або тунельними [1] подільниками.

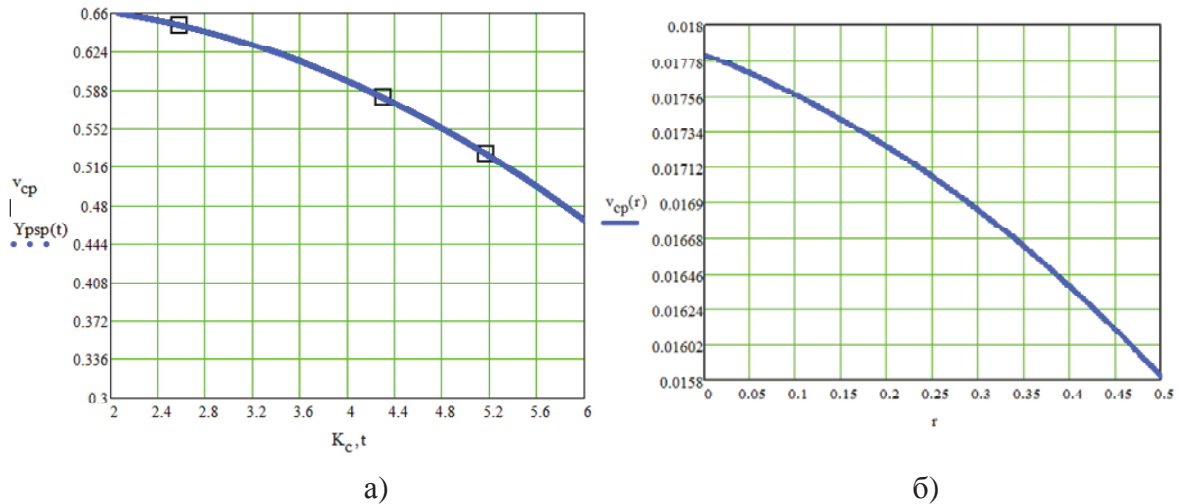


Рисунок 4 – Залежність швидкості переміщення шару зерна від коефіцієнта відцентровості  $V_{cp}(k_r)$  (а) та радіуса поверхні  $V_{cp}(r(h))$  (б)

Джерело: розроблено авторами з використанням [1, 9]

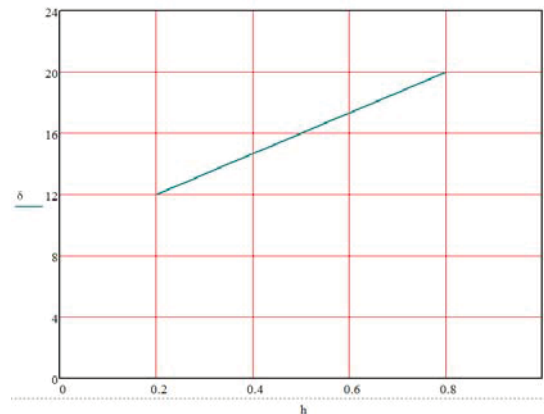


Рисунок 5 – Зміна товщини шару зерна при переміщенні на конічній поверхні вібровідцентрової центрифуги

Джерело: розроблено авторами з використанням [1, 9]

Поставлена задача досліджень була вирішена за рахунок визначення часу розшарування, тобто часу коли важка зернівка досягне поверхні конуса і щоб переміщення шару зерна до вивантаження не було меншим за час розшарування.

**Висновки.** Сформульовано вдосконалені математичні моделі переміщення зернівки у вібропневмозрідженому шарі конічної вібровідцентрової центрифуги, які враховують зміну дії відцентрової сили в залежності від координати зернівки за висотою конуса, які дозволяють з різним ступенем точності визначити параметри руху.

Показано, що при використанні конічної опорної поверхні вібровідцентрової центрифуги товщина перемішуючого шару зерна збільшується в напрямку руху і можна теоретичними розрахунками визначити раціональні геометричні та кінематичні параметри ротора, які забезпечують якісний поділ матеріалу за густиною.

## Список літератури

1. Тищенко Л. Н. Интенсификация сепарирования зерна. Харьков : Основа, 2004. 224 с.
2. Дринча В. М. Исследование сепарации семян и разработка машинных технологий их подготовки. Воронеж :Издательство НПО «МОДЭК», 2006. 384 с.



3. Гончаров Е.С. О рациональной форме поверхности виброцентробежных решет . *Механизация и электрификация с-х*. 1962. №5. С.53-55.
4. Бредихин В.В. Обоснование параметров процесса вибропневматического разделения семенных смесей по плотности семян: дис. ... канд.техн.наук. Харьков, 2003. 246 с.
5. Малюта С.И. Обоснование технологического процесса и параметров семеноочистительной пневмоцентрифуги: автореф. дис. канд. техн. наук. Глеваха, 1989. 21 с.
6. Гончаров Е. С. Ступенчатое решето для виброцентробежных сепараторов . *Механизация и электрификация с-х*. 1984. Вып. 59. С.33-36.
7. Гончаров Е.С., Малюта С.И. Механико-математическая модель движения частиц семенной смеси по поверхности ротора пневмовибрационного сепаратора . *Механизация и электрификация с-х*. 1986. Вып. 64. С. 24-29.
8. Адамчук В.В., Прилуцкий А.Н. Теоретичні дослідження безрешітної пневмовібровідцентробіжної сепарації насінневих сумішей . *Механізація та електрифікація с-г*. 2017. Вип. 5(104). С. 17-27.
9. Заїка П.М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах. К. : УСХА, 1998. 625 с.
10. Котов Б.І., Степаненко С.П., Пастушенко М.Г. Дослідження шляхів підвищення ефективності віброрешітних сепараторів зерна і насіння. *Вінницький державний аграрний університет, Зб. наук. праць. «Вібрації в техніці та технологіях»*. 2004. Вип. 3(35). С.61-63
11. Котов Б.І., Швидя В.О., Степаненко С.П., Пастушенко М.Г. Моделювання вібраційної динаміки переміщення дисперсійного матеріалу на конічній поверхні решета зерносепаратора . *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2013. Вип. 43, ч. 1. С. 77-83.
12. Котов Б.І., Деревенько І.А., Степаненко С.П., Попадюк І.С. Теоретичні аспекти сепарації зернових матеріалів на ступінчасто-конічному решеті вібровідцентрових машин . *Вібрації в техніці та технологіях: зб. наук. праць*. 2016. Вип. 3(83). С.175-180.
13. Котов Б.І. Ідентифікація параметрів сипкого середовища у віброзрідженому шарі за експериментальними даними . *Збірник наукових праць Національного аграрного університету*. 2002. Т. XV. С. 161-163.
14. Богатирьов Д. В. Обґрунтування параметрів пневмоімпульсної машини для сепарації насіння за густиною : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Кіровоград, 2005 176 с.
15. Stepanenko, S.; Kotov, B.; Kuzmych, A.; Shvydia, V.; Kalinichenko, R.; Kharchenko, S.; Shchur, T.; Kocira, S.; Kwa'sniewski, D.; Dziki, D. (2022). To the Theory of Grain Motion in an Uneven Air Flow in a Vertical Pneumatic Separation Channel with an Annular Cross Section. *Processes* 2022, 10, 1929. <https://doi.org/10.3390/pr10101929>
16. Stepanenko, S.P., Kotov B. I., Spirin A.V., Kucheruk V.Yu. (2022). Scientific foundations of the movement of components of grain material with an artificially formed distribution of air velocity. *Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика»*. № 1(105)/2022. P. 43-57. DOI 10.31489/2022PH1/43-57
17. Adamchuk V., Bulgakov V., Gadzalo I., Ivanovs S., Stepanenko S., Holovach I., Ihnatiev Y. (2021) . Theoretical Study of Vibrocentrifugal Separation of Grain Mixtures on a Sieveless Seed-cleaning Machine *Journal of Latvia university of life sciences and technologies. Rural sustainability research*. 46(341), 2021. P. 116-124. DOI:10.2478/plua-2021-0023
18. Степаненко С.П., Котов Б.І., Калініченко Р.А. (2021) Дослідження руху частинок зернового матеріалу у вертикальному каналі за умов дії пульсацій повітряного потоку . *Сільськогосподарські машини*. 2021. Вип. 47. С. 25-37. <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.619>
19. Степаненко С.П., Котов Б.І. (2021) Математичне моделювання процесу фракціонування зернового матеріалу у пневмогравітаційному сепараторі. *Вісник Львівського національного аграрного університету «Агроінженерні дослідження»*. 2021. Вип. 25 (2021). С.12-20. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2021.25.012>
20. Kharchenko, S.; Borshch, Y.; Kovalyshyn, S.; Piven, M.; Abduev, M.; Miernik, A.; Popardowski, E.; Kielbasa, P. Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct. *Appl. Sci.* 2021, 11, 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383>
21. Bredykhin, V., Pak, A., Gurskyi, P., Denisenko, S., Bredykhina, K. (2021). Improving the mechanical-mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (112)), 54–60. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236938>
22. I.; Rogovskii, I.; Titova, L.; Omelyanov, O. (2021) Experimental evaluation of energy parameters of volumetric vibroseparation of bulk feed from grain. *Eng. Rural Devel.* 2021, 20, 1761–1767. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF386>

## References

1. Tishchenko, L.N. (2004). *Intensification of grain separation [Intensifikacija separirovaniya zerna]*. Kharkiv: Osnova, 2004 [in Russian].
2. Drincha, V.M. (2006). *Issledovanie separacii semjan i razrabotka mashinnyh tehnologij ih podgotovki [Research of seed separation and development of machine technologies for their preparation]*. Voronezh : Izdatel'stvo NPO «MODJeK» [in Russian].
3. Goncharov, E.S. (1962). O racional'noj forme poverhnosti vibrocentroveznyh reshet . [On the rational shape of the surface of vibrocentrifugal sieves]. *Mehanizacija i jelektrifikacija s-h – Mechanization and electrification of agriculture, 5*, 53-55 [in Russian].
4. Bredihin, V.V. (2003). Obosnovanie parametrov processa vibropnevmaticheskogo razdelenija semennyh smesej po plotnosti semjan [Substantiation of the parameters of the process of vibropneumatic separation of seed mixtures by seed density]. *Doctor's thesis*. Kharkiv [in Russian].
5. Maljuta, S.I. (1989). Obosnovanie tehnologicheskogo processa i parametrov semenoochistitel'noj pnevmocentrifugi [Substantiation of the technological process and parameters of the seed-cleaning pneumocentrifuge]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Glevaha [in Russian].
6. Goncharov, E.S. (1984). Stupenchastoe resheto dlja vibrocentroveznyh separatorov [Stepped sieve for vibrocentrifugal separators]. *Mehanizacija i jelektrifikacija s-h – Mechanization and electrification of agriculture, Issue 59*, 33-36 [in Russian].
7. Goncharov, E.S. & Maljuta, S.I. (1986). Mehaniko-matematicheskaja model' dvizhenija chastic semennoj smesi po poverhnosti rotora pnevmovibracionnogo separatora . [Mechanical and mathematical model of the movement of particles of the seed mixture on the surface of the rotor of a pneumovibrational separator] . *Mehanizacija i jelektrifikacija s.-h – Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya s.-kh, Issue. 64*, 24-29 [in Russian].
8. Adamchuk, V.V. & Prylutskyj, A.N. (2017). Teoretychni doslidzhennia bezreshitnoi pnevmovibrovidtsentobizhnoi separatsii nasinnievkykh sumishej [Theoretical studies of sieveless pneumovibrocentrifugal separation of seed mixtures]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia s-h. – Mechanization and electrification of rural areas. Issue 5(104)*, 17-27 [in Ukrainian].
9. Zaika, P.M. (1998). *Vibracionnoe peremeshhenie tverdyh i sypuchih tel v sel'skohozjajstvennyh mashinah [Vibratory movement of solid and loose bodies in agricultural machines]*. Kiev. USHA [in Russian].
10. Kotov, B.I., Stepanenko, S.P. & Pastushenko, M.G. (2004). Doslidzhennia shliakhiv pidvyschennia efektyvnosti vibroreshitnykh separatoriv zerna i nasinnia [Research on ways to improve the efficiency of vibrating sieve separators for grain and seeds] . *Vynnyts'kyj derzhavnyj ahrarnyj universytet, zb. nauk. prats'. «Vybratsyy v tekhnike y tekhnolohiyakh» – Coll. of science works "Choices in engineering and technology". Issue 3(35)*, 61-63 [in Ukrainian].
11. Kotov, B.I., Shvydya, V.O., Stepanenko, S.P. & Pastushenko, M.G. (2013). Modeliuvannia vibratsijnoi dynamiky peremischennia dyspersijnogo materialu na konichnij poverkhni resheta zernoseparatora [Modeling of the vibrational dynamics of the movement of dispersion material on the conical surface of the sieve of the grain separator]. *Konstruivannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil'skohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Issue 43. part I*, 77-83 [in Ukrainian].
12. Kotov, B.I., Dereven'ko, I.A., Stepanenko, S.P., Popadyuk, I.S. (2016). Teoretychni aspekty separatsii zernovykh materialiv na stupinchasto-konichnomu resheti vibrovidtsentrovnykh mashyn [Theoretical aspects of the separation of grain materials on the step-conical sieve of vibro-centrifugal machines]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh: zb. nauk. prats'. – Vinnytsia National Agrarian University. Coll. of science works "Vibrations in engineering and technology". Vol. 3(83)*, 175-180 [in Ukrainian].
13. Kotov, B.I. (2002). Identyfikatsiia parametrov sypkoho seredovyscha u vibrozridzhenomu shari za eksperymental'nyimi danymi [Identification of the parameters of the fluid medium in the vibro-liquefied layer based on experimental data]. *Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'noho ahrarnoho universytetu – Collection of scientific papers of the National Agrarian University, Vol. XV*, 161-163 [in Ukrainian].
14. Bohatyrov, D.V. (2005). Obruntuvannia parametrov pnevmoimpul'snoi mashyny dlja separatsii nasinnia za hustynoiu [Justification of the parameters of the pneumatic pulse machine for separating seeds by density]. *Candidate's thesis*. Kirovohrad [in Ukrainian].
15. Stepanenko, S.; Kotov, B.; Kuzmych, A.; Shvydia, V.; Kalinichenko, R.; Kharchenko, S.; Shchur, T.; Kocira, S.; Kwaśniewski, D.; Dziki, D. (2022). To the Theory of Grain Motion in an Uneven Air Flow in a Vertical Pneumatic Separation Channel with an Annular Cross Section. *Processes 2022, 10*, 1929. <https://doi.org/10.3390/pr10101929> [in English].
16. Stepanenko, S.P., Kotov, B. I., Spirin, A.V. & Kucheruk, V.Yu. (2022). Scientific foundations of the movement of components of grain material with an artificially formed distribution of air velocity. *Vestnik*

- Karagandinskogo universiteta. –Serija «Fizika» Bulletin of Karaganda University. Series "Physics", I(105)/2022, p. 43-57. DOI 10.31489/2022PH1/43-57 [in English].*
17. Adamchuk, V., Bulgakov, V., Gadzalo, I., Ivanovs, S., Stepanenko, S., Holovach, I. & Ihnatiev, Y. (2021). Theoretical Study of Vibrocentrifugal Separation of Grain Mixtures on a Sieveless Seed-cleaning Machine *Journal of Latvia University of Life Sciences and Technologies. Rural sustainability research.* 46(341), p. 116-124. DOI:10.2478/plua-2021-0023 [in English].
  18. Stepanenko, S.P., Kotov, B.I. & Kalinichenko, R.A. (2021). Doslidzhennia rukhu chastynok zernovoho materialu u vertykal'nomu kanali za umov dii pul'satsij povitrianoho potoku [Study of the movement of grain material particles in a vertical channel under the conditions of air flow pulsations]. *Sil's'kohospodars'ki mashyny – Agricultural machinery. Issue 47, 25-37.* <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.619> [in Ukrainian].
  19. Stepanenko, S.P. & Kotov, B.I. (2021). Matematyчне modeliuвання protsesu fraktsionuvannya zernovoho materialu u pnevmohravitatsijnomu separatori [Mathematical modeling of the fractionation process of grain material in a pneumogravity separator]. *Visnyk L'vivs'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu «Ahroinzhenerni doslidzhennia» – Bulletin of the Lviv National Agrarian University "Agroengineering Research", Issue 25 (2021), 12-20.* <https://doi.org/10.31734/agroengineering2021.25.012> [in Ukrainian].
  20. Kharchenko, S.; Borshch, Y.; Kovalyshyn, S.; Piven, M.; Abduev, M.; Miernik, A.; Popardowski, E.; Kielbasa, P. (2021). Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct. *Appl. Sci.* 11, 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383> [in English].
  21. Bredykhin, V., Pak, A., Gurskyi, P., Denisenko, S. & Bredykhina, K. (2021). Improving the mechanical-mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (112)), 54–60. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236938> [in English].
  22. Rogovskii, I., Titova, L. & Omelyanov, O. (2021). Experimental evaluation of energy parameters of volumetric vibroseparation of bulk feed from grain, *Eng. Rural Devel.* 20, 1761–1767. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF386> [in English].

**Borys Kotov**, Prof., DSc.

*Podillia State University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine*

**Serhiy Stepanenko**, Prof., DSc.

*Institute of Mechanics and Automatics of Agroindustrial Production, Glevakha, Ukraine*

**Roman Kalinichenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Separated Subdivision NULESU (Nizhyn Agrotechnical Institute), Nizhyn, Ukraine*

### **Theoretical Study of the Separation of Seed Material According to the Density of Grains by a Conical Vibro-pneumocentrifuge**

The article examines the study of the separation of seed material by grain density by a conical vibro-pneumocentrifuge, taking into account the distribution of air velocity in the cross section of the aspiration channel, to determine the rational form and parameters of the working bodies of the conical vibro-pneumocentrifuge, as well as technological indicators of the machine: supply, consumption, efficiency of seed separation into factions.

Scientific research has formulated improved mathematical models of grain movement in the vibro-pneumofluidized layer of a conical vibrocentrifuge centrifuge, which take into account the change in the action of the centrifugal force depending on the grain coordinate along the height of the cone, allowing to determine the movement parameters with varying degrees of accuracy.

It is substantiated that when using a conical support surface of a vibrocentrifugal centrifuge, the thickness of the mixing layer of grain increases in the direction of movement, and it is possible to determine by theoretical calculations the rational geometric and kinematic parameters of the rotor, which ensure a qualitative separation of the seed material by density.

The obtained systems of nonlinear differential equations with initial conditions are solved in the MathCad software environment in the form of grain movement trajectories in the air flow, which allows to calculate and establish the trends of their movement trajectories, which differ by windage coefficients, and to determine the rational values of the parameters of the conical vibropneumocentrifuge.

**seed material, density, grain, conical vibro-pneumocentrifuge, air flow, separation process**

*Одержано (Received) 25.10.2022*

*Прорецензовано (Reviewed) 02.11.2022*

*Прийнято до друку (Approved) 26.12.2022*