

**Котов Б.І.**

Д.Т.Н., професор

**Заклад вищої освіти  
«Подільський державний  
університет»****Степаненко С.П.**Д.Т.Н., старший науковий  
співробітник**Інститут механіки та  
автоматики  
агропромислового  
виробництва****Грушецький С.М.**

К.Т.Н., доцент

**Заклад вищої освіти  
«Подільський державний  
університет»****Грищенко В.О.**

К.Т.Н., старший викладач

**Національний  
університет біоресурсів  
та природокористування  
України****Kotov B.**Doctor of Technical Sciences,  
Professor**Institute of Higher  
Education "Podilskyi State  
University"****Stepanenko S.**Doctor of Technical Sciences,  
senior researcher**Institute of Mechanics and  
Automation of Agricultural  
Production****Grushetskyi S.**Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor**Institute of Higher  
Education "Podilskyi State  
University"****Hryshchenko V.**candidate of technical sciences,  
senior lecturer**National University of  
Bioresources and Nature  
Management of Ukraine****УДК 631.362.3****DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3-3****МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ  
СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНА ЗА  
ГУСТИНОЮ В КОМБІНОВАНОМУ  
ВІБРОПНЕВМАТИЧНОМУ ТА  
ПОВІТРЯНО-ГРАВІТАЦІЙНОМУ  
АГРЕГАТІ**

Встановлено, що способом інтенсифікації перебігу робочого процесу є організація подачі в шар пульсуючого потоку повітря. Застосовуючи пульсуючий потік повітря можна за рахунок зміни величини дії імпульса сили за умов незмінної швидкості змінювати величину аеродинамічної дії на зернову масу. При цьому вплив пульсуючого потоку на здатність переміщення зернівок різною масою (густиною) буде різним, що може інтенсифікувати поділ насіння за густиною. Дослідження сукупної дії вібрацій і пульсуючого повітряного потоку на розшарування зернового потоку і поділ за густиною є важливою науково-технічною задачею.

Проведений аналіз публікацій виявив перспективну можливість використання серійних віброрешітних машин з пневмосистемою для підготовки комбінованих машин з пневмосистемою для підготовки якісного насіння, замість вібропневмостолів. Для дослідження ефективності сумісного використання вібропневмозрідженого та пневмогравітаційного руху матеріалу.

Обґрунтовано, що інтенсифікуюча дія пульсуючого потоку полягає у різній силі впливу на легкі і важкі зернівки. В основі математичного опису процесу поділу сипкого матеріалу за густиною лежать рівняння руху частинки в коливному середовищі, справедливе для будь-якого нерозривного середовища, яке має властивість інертності.

Сформульовані математичні моделі процесів переміщення компонентів зернового матеріалу у віброзрідженому шарі та в повітряному каналі вібропневмоочисної машини дозволять визначити траєкторії переміщення зернівок в робочих зонах та на основі їх аналізу обґрунтувати параметри робочих органів.

Проведеною апробацією математичного опису процесів поділу компонентів зернового матеріалу підтверджено підвищення ефективності використання пульсуючих потоків для розділення зерна за густиною.

**Ключові слова:** вібропневматичний, повітряно-гравітаційний агрегат, зернівка, вібрація, змінна швидкість, траєкторія, коефіцієнт тертя.



**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням поділу зернового матеріалу за густиною при використанні вібраційно-пневматичного впливу на потік зерна присвячено значна кількість публікацій проаналізованих і узагальнених у фундаментальних роботах [1, 2]. Визначено переваги і недоліки існуючих способів поділу за густиною, конструкції машин та їх параметрів в тому числі і з прямоточними деками [3, 4]. В роботах [5, 6] визначено переміщення «важкої» частинки у вібропневмозрідженому шарі прямоточного решітного сепаратора. Показано можливість поділу матеріалів за вагою на поверхні віброрешітного сепаратора, тобто можливість використання елементної бази серійних віброрешітних сепараторів для поділу зерна за густиною.

В роботах [7, 8] визначено реальну можливість інтенсифікації процесу сепарації на решетах застосуванням пульсуючих потоків повітря.

В роботі [9] досліджено процес поділу зернового матеріалу за густиною на решітній поверхні при зрідженні зернового потоку пульсаціями повітря без використання вібрацій.

Застосування одночасної пульсуючого потоку повітря та вібрацій жалюзійної решітки при сепарації зерносоломистого вороху розглянуто в роботі [10]. В роботі [11] сформульовано модель внутрішарового переміщення зернівок в шарі соломистого вороху, та подано методичку ідентифікації параметрів моделі.

Попередній аналіз можливості поділу зернових матеріалів за густиною на існуючих машинах [12 - 14] різними способами дозволив встановити, що з достатньою ефективністю процес поділу здійснюється, як вібраційним так і вібропневматичним способами при коливному русі опорної поверхні, як в горизонтальному так і вертикальному напрямках. В роботах [15, 16] визначено широкі можливості поділу зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями, до

яких відноситься і густина частинок при їх однакових розмірах, що дає можливість використання пневмосепаруючих (аспіраційних) віброрешітних машин для додаткового поділу фракцій насіння розділених на решеті вібропневматичним способом.

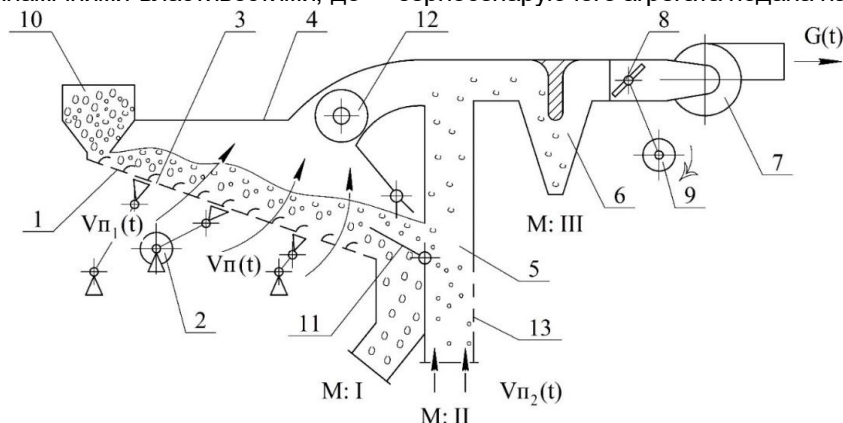
Попередній аналіз можливості поділу зернових матеріалів за густиною на існуючих машинах [12 - 14] різними способами дозволив встановити, що з достатньою ефективністю процес поділу здійснюється, як вібраційним так і вібропневматичним способами при коливному русі опорної поверхні, як в горизонтальному так і вертикальному напрямках. В роботах [15 - 21] визначено широкі можливості поділу зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями, до яких відноситься і густина частинок при їх однакових розмірах, що дає можливість використання пневмосепаруючих (аспіраційних) віброрешітних машин для додаткового поділу фракцій насіння розділених на решеті вібропневматичним способом. Таким чином проведений аналіз публікацій виявив перспективну можливість використання серійних віброрешітних машин з пневмосистемою для підготовки комбінованих машин з пневмосистемою для підготовки якісного насіння, замість вібропневмостолів. Для дослідження ефективності сумісного використання вібропневмозрідженого та пневмогравітаційного руху матеріалу.

#### Формулювання мети дослідження.

Сформулювати математичний опис процесів переміщення зернівок різної густини у пневмовіброзрідженому шарі і повітряному каналі при дії повітряних потоків із зміною в часі швидкості.

#### Результати дослідження.

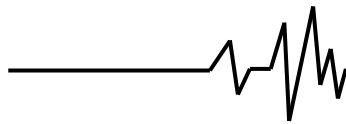
Розглядаються процеси поділу зернового (насінного) матеріалу в комбінованому пневмовіброрешітному сепараторі і пневмосепаруючому каналі з пульсуючими повітряними потоками, які інтегровані в одному агрегаті. Технологічна схема зерносепаруючого агрегата подана на рис. 1.



**Рис. 1. Технологічна схема функціонування комбінованого зерносепаруючого агрегату**

1 – перфорована дека (безпровальне решето); 2 – вібробуджувач; 3 – опори; 4 – аспіраційна камера; 5 – вертикальний пневмоканал; 6 – осаджувальна

камера; 7 – вентилятор; 8 – оберտальна заслінка пульсатор; 9 – привід заслінки; 10 – бункер; 11 –



подільник; 12 – заслінка регулююча потік повітря  
під декою;  
13 – щілини перфорації повітряного потоку

В пневмовіброзрідженому шарі на віброуючій лускатій поверхні шар зернового матеріалу розподіляється (як мінімум) на дві фракції: легкі зернівки «спливають» до відкритій поверхні шару, а важкі занурюються в шар до поверхні деки і рухаються за складною траєкторією та виводяться в кінці деки назовні. Легкі зернівки відокремлюються подільником і подаються у вертикальний пневмоканал, де частина легкої фракції поділяється за швидкістю витання ще на дві фракції: більш легкі виносяться потоком повітря і видаляються в осаджувальній камері із потоку повітря, а більш важкі рухаються в каналі донизу. Таким чином відбувається поділ на три фракції.

Інтенсифікуюча дія пульсуючого потоку полягає у різній силі впливу на легкі і важкі зернівки.

В основі математичного опису процесу поділу сипкого матеріалу за густиною лежать рівняння руху частинки в коливному середовищі, справедливе для будь-якого нерозривного середовища, яке має властивість інертності:

$$m_1 \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} = m_0 \cdot [\Delta - 1] \cdot \left[ g - \frac{d\bar{u}}{dt} \right] + \sum \bar{F}(\vartheta) \quad (1)$$

де  $\Delta = \frac{m_1}{m_0} = \frac{\rho_1}{\rho_0}$ ;  $m_1$  – маса зернівки;  $m_0$  – маса середовища в об'ємі зернівки;  $\vartheta$  – швидкість зернівки відносно середовища;  $u$  – абсолютна швидкість зернівки в переносному русі;  $\sum \bar{F}(\vartheta)$  – сили опору відносно рухові зернівки;  $g$  – прискорення сили тяжіння.

Швидкість коливань середовища (вібропневмозріджений шар зернового матеріалу) співпадає із швидкістю коливань решета і носить гармонічний характер  $u = A \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t)$ .

Сила опору середовища визначається, як сила в'язкого тертя яка пропорційна швидкості руху зернівки в першому степені. Сила опору повітряного потоку пропорційна квадрату відносної швидкості зернівки. Зміна швидкості повітряного потоку в шарі матеріалу на деці та в пневмоканалі апроксимована рівнянням [21]:

$$V_p(t) = A_{1,2} \cdot [1 \pm \sin(\omega_1 \cdot t)] \quad (2)$$

де  $A_{1,2}$  – максимальна амплітуда коливань швидкості потоку під декою ( $A_1$ ) та в

повітряному каналі ( $A_2$ );  $\omega_1$  – частота обертання заслінки пульсатора.

За означених умов проекції диференціального рівняння (1) на вісі координат XOY, які рухаються разом з решетом, можуть бути записані у вигляді [10]:

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + K_x \cdot \frac{dx(t)}{dt} = G_x + A_{1x} \cdot [\sin(\omega_1 \cdot t)] - [A_{2x} \cdot [1 + \sin(\omega_1 \cdot t)]]^2 \quad (3)$$

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + K_y \cdot \frac{dy(t)}{dt} = G_y + A_{1y} \cdot [\sin(\omega_1 \cdot t)] - [A_{2y} \cdot [1 + \sin(\omega_1 \cdot t)]]^2 \quad (4)$$

де  $G_x = \frac{m_1 - m_0}{m_1} \cdot g \cdot \sin \alpha$ ;  
 $G_y = \frac{m_1 - m_0}{m_1} \cdot g \cdot \cos \alpha$ ;  $\alpha$  – кут нахилу деки до горизонту;  $\beta$  – кут спрямованості коливань деки;  $\gamma$  – кут вектора руху повітряного потоку в каналі;

$A_{1x} = \frac{m_1 - m_0}{m_1} \cdot A_1 \cdot \omega_1^2 \cdot \cos \beta$ ;

$A_{1y} = \frac{m_1 - m_0}{m_1} \cdot A_1 \cdot \omega_1^2 \cdot \sin \beta$ ;  $A_{2x} = k_V \cdot A_2^2 \cdot \cos \gamma$ ;

$A_{2y} = k_V \cdot A_2^2 \cdot \sin \gamma$ ;  $k_V = \frac{g}{V_{\text{Віт}}^2}$ ;

$K_{x,y} = 3 \cdot \mu_{\text{Віб}} \cdot d_{x,y} \cdot m_1^{-1}$ ;  $d_{x,y}$  – діаметр міделевого перетину зернівки (вздовж ( $d_x$ ) та в поперек ( $d_y$ ));

$\mu_{\text{Віб}}$  – коефіцієнт ефективної вібров'язкості [16, 18] визначається формулою:

$$\mu_{\text{Віб}} = 0,2 \cdot \frac{[0,5 \cdot d_{x,y}]^2}{\pi \cdot A_{1x,y} \cdot \omega_1} \cdot \rho_z \cdot [1 - \varepsilon]^2 \cdot g \cdot [1 - 0,12 \cdot f_1] \cdot f_1 \quad (5)$$

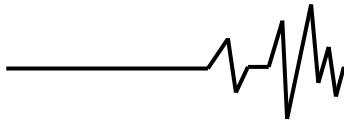
де  $\varepsilon$  – порозність зернового шару;  $f_1$  – коефіцієнт внутрішнього тертя;  $\rho_z$  – густина зернівки, яка рухається в шарі.

Розв'язок рівнянь (3) та (4) з урахуванням (5) при початкових умовах:

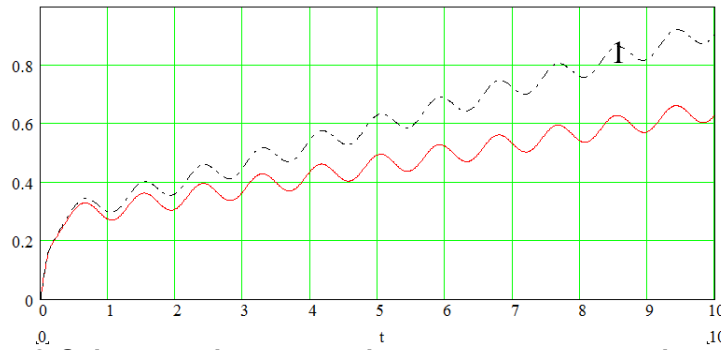
$$t = 0; x(0) = y(0) = 0; \dot{x}(0) = \frac{dx(t)}{dt} = \vartheta_{x0} \cos \alpha_0 = 0; \dot{y}(0) = \frac{dy(t)}{dt} = \vartheta_{y0} \sin \alpha_0 = 0 \quad (6)$$

де  $\vartheta_{x0}, \alpha_0$  - початкова швидкість і кут подачі зернового матеріалу.

Отримано в програмному середовищі MathCad і представлено на рис.2 та рис.3 у вигляді залежностей переміщення від часу.



$S_m \cdot 10^{-2}, \text{ м}$



2

Рис.2. Зміна переміщення зернівки при сталому потоці повітря.

1 -  $m = 4,2 \cdot 10^{-6}$  кг; 2 -  $m = 2,4 \cdot 10^{-6}$  кг;

t, с

$S_m \cdot 10^{-2}, \text{ м}$

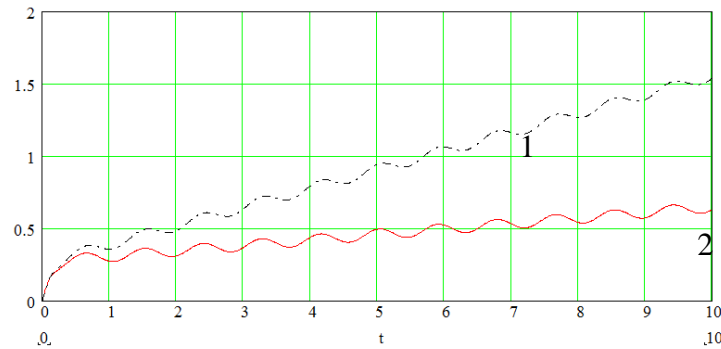


Рис.3. Зміна переміщення зернівки в шарі при пульсуючому потоці повітря.

1 -  $m = 4,2 \cdot 10^{-6}$  кг; 2 -  $m = 2,4 \cdot 10^{-6}$  кг;

При сходженні зернівок із вібраційного шару в повітряний канал [5, 14, 18] із рівномірним полем швидкості повітряного потоку в поперечному перетині (прямокутний канал), на зернівку діють сили тяжіння та опору повітряного потоку. Диференціальне рівняння руху зернівок в координатах ХОУ можна використати у вигляді:

$$m \cdot \frac{d^2x(t)}{dt^2} = g - k_V \cdot V_p(t) \cdot \left[ V_p(t) + \frac{dx(t)}{dt} \right] \cdot \sqrt{\left[ 1 + \frac{1}{V_p(t)} \cdot \frac{dx(t)}{dt} \right]^2 + \left[ \frac{1}{V_p(t)} \cdot \frac{dy(t)}{dt} \right]^2} \quad (7)$$

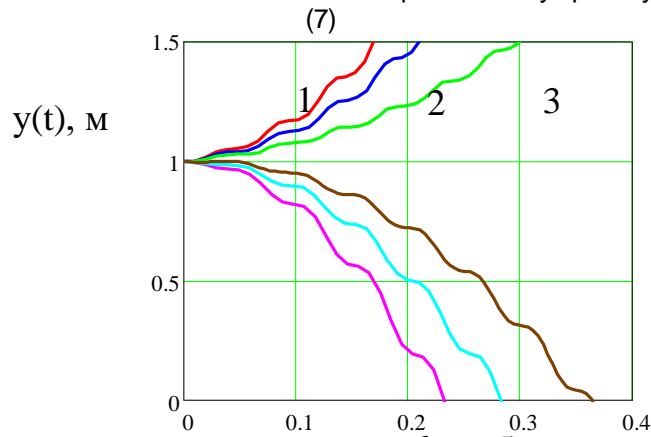
$$m \cdot \frac{d^2y(t)}{dt^2} = -k_V \cdot V_p(t) \cdot \left[ \frac{dy(t)}{dt} \right] \cdot \sqrt{\left[ 1 + \frac{1}{V_p(t)} \cdot \frac{dx(t)}{dt} \right]^2 + \left[ \frac{1}{V_p(t)} \cdot \frac{dy(t)}{dt} \right]^2} \quad (8)$$

Розв'язок системи рівнянь (7) та (8) за початкових умов:

$$t = 0; x(0) = y(0) = 0; \frac{1}{V_p(t)} \cdot \frac{dx(t)}{dt} = \frac{v_{x0}}{V_p(t)}$$

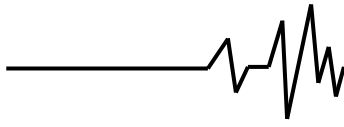
$$\sin \alpha_0; \frac{1}{V_p(t)} \cdot \frac{dy(t)}{dt} = \frac{v_{y0}}{V_p(t)} \cdot \cos \alpha_0 \quad (9)$$

отримано у вигляді траєкторій руху зернівок при пульсуючому повітряному потоці у вертикальному прямокутному каналі рис. 4.



1 - 6 - відповідно  $k_V = 0,38; 0,34; 0,3; 0,18; 0,13; 0,06$

Рис. 4. Траєкторії руху зернівок у пульсуючому нерівномірному потоці повітря



Аналіз графічних залежностей траєкторій руху зернівок з різними значеннями  $k_V$  у вертикальному прямокутному каналі, встановив можливість впливу дії окремих сил, а також режимів процесу сепарування на величину розгалуження їх траєкторій, що в кінцевому випадку визначає ефективність поділу зернового матеріалу. З аналізу траєкторій встановлено, що нерівномірна епіюра швидкості повітря у вертикальному прямокутному каналі негативно впливає на величину розгалуження траєкторій, тобто відстань між траєкторіями зростає. Таким чином встановлено, що застосування імпульсного потоку повітря у вертикальному прямокутному каналі дає можливість збільшити розходження (розгалуження) траєкторій руху зернівок за висотою каналу.

### Висновки

Сформульовані математичні моделі процесів переміщення компонентів зернового матеріалу у віброзрідженому шарі та в повітряному каналі вібропневмоочисної машини дозволять визначити траєкторії переміщення зернівок в робочих зонах та на основі їх аналізу обґрунтувати параметри робочих органів.

Проведеною апробацією математичного опису процесів поділу компонентів зернового матеріалу підтверджено підвищення ефективності використання пульсуючих потоків для розділення зерна за густиною.

### Список використаних джерел

1. Василенко П. М. Теория движения частиц по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев, 1960. 283 с.
2. Блехман И. И., Дженелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение. М. Наука, 1964. 410 с.
3. Заика П. М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах. К. УСХА, 1998. 625 с.
4. Тищенко Л. Н. Интенсификация сепарирования зерна. Харьков: Основа, 2004. 224 с.
5. Степаненко С.П. Визначення впливу швидкості занурення зернини у зерноsumіші зернового потоку на загальну якість сепарування насіння. Стан та перспективи розвитку агропромислового виробництва в сучасних умовах: Вісник степу. Науковий збірник. – Кіровоград: Центрально-українське видавництво, 2005. – С. 121-123.
6. Котов Б.І., Степаненко С.П. Теоретичні передумови інтенсифікації вібропневматичного розділення зернових матеріалів на решетах. Кіровоградський державний технічний університет. Зб. наук. пр. // Конструювання, виробництво та експлуатація

сільськогосподарських машин. Випуск 35. – Кіровоград, 2005. – С. 209-214.

7. Петренко Н. Н., Марченко И. В., Марченко К. Н. О возможности использования пульсирующего воздушного потока для воздушно-решетной очистки зернового вороха. Конструювання, виробництво та експлуатація с-г. машин. Кіровоград, 2002. Вип.32. С.117-121.

8. Петренко Н. Н., Марченко И. В., Марченко К. Н. Анализ процесса сепарации зерна на решете в среде пульсирующего воздушного потока. Конструювання, виробництво та експлуатація с-г машин. Кіровоград, 2003. Вип.33. С.141-149.

9. Богатирьов Д. В. Обґрунтування параметрів пневмоімпульсної машини для сепарації насіння за густиною : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Кіровоград, 2005 176 с.

10. Котов Б.І., Степаненко С. П. Дослідження впливу пульсуючого повітряного потоку на переміщення зерна у віброзрідженому шарі зерносоломистого вороху. Механізація та електрифікація сільського господарства. Глеваха, 2016. Вип. №4 (103). С.38-46.

11. Котов Б.І., Спирін А.В., Зозуляк О.В. Моделювання та ідентифікація процесу сепарації дрібного вороху вібраційно-повітряними очистками зернозбирального комбайна / Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2016. №4. С. 10-14.

12. Гортинский В. В., Демский А. Б., Борискин М. А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. 304 с.

13. Омелянов О. М., Токарчук О. А. Обґрунтування амплітудно частотних характеристик та конструктивних параметрів сепаратора з вібраційним приводом збудження просторових коливань. *Вібрації в техніці та технологіях*. № 1 (104). 2022. С. 30-37.

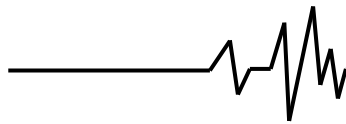
14. Степаненко С.П., Котов Б.І., Рудь А.В., Задрій М.А. Теоретичні дослідження процесу руху зернового матеріалу на поверхні ступінчастого віброживильника. *Вібрації в техніці та технологіях*. № 2 (105). 2022. С. 25-32.

15. Дулаев В.Г., Яцевич Г.В., Гортинський В.В. Анализ вибрационного и вибропневматического разделения зерновок пшеницы различной плотности и стекловидности // Труды ВНИИ зерна. 1986. Вип. 107. С. 84-91.

16. Котов Б.І. Вібропневматичне розділення насінневих сумішей // Вісник аграрної науки. 2004. №5. С.55-58.

17. Котов Б.І. Ідентифікація параметрів сипкого середовища у віброзрідженому шарі за експериментальними даними // Збірник наукових праць НАУ. К. 2003. Т. XV. – с. 161 – 163.

18. Степаненко С.П. Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна // Дис. ...канд. техн. наук. – Глеваха.: ННЦ «ІМЕСГ». – 2008. – 183 с.



19. Пивень М.В. Обоснование параметров процесса решетного сепарирования зерновых смесей. Автореф. дис. канд. техн. наук. Х. 2006 – 24с.

20. Бредихін В. В. Обґрунтування параметрів процесу вібропневмовідцентрового розділення насінневих сумішей за густиною насіння. Автореф. Дис. канд. техн. наук. Х. - 2003. 20 с.

21. Степаненко С.П. Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: 05.05.11 / С. П. Степаненко. – Глеваха, 2021. – 50 с.

### Reference

1. Vasilenko P.M. Theory of particle motion on rough surfaces of agricultural machines. - Kiev, 1960.- 283 p.

2. Blekhman I.I., Dzhanelidze G.Yu. Vibration displacement. - M. Nauka, 1964. - 410 p.

3. Zaika P. M. Vibrational movement of solid and loose bodies in agricultural machines. K. USHA, 1998. 625 p.

4. Tishchenko L.N. Intensification of grain separation. - Kharkov: Osnova, 2004. - 224 p.

5. Stepanenko S.P. Determination of the influence of the speed of grain immersion in the grain mixture of the grain flow on the overall quality of seed separation. The state and prospects of the development of agro-industrial production in modern conditions: Herald of the Steppe. Scientific collection. – Kirovohrad: Central Ukrainian Publishing House, 2005. – P. 121-123.

6. Kotov B.I., Stepanenko S.P. Theoretical prerequisites for intensification of vibropneumatic separation of grain materials on sieves. Kirovohrad State Technical University. Coll. of science pr. // Design, production and operation of agricultural machines. Issue 35. - Kirovohrad, 2005. - P. 209-214.

7. Petrenko N.N., Marchenko I.V., Marchenko K.N. On the possibility of using a pulsating air flow for air-sieve cleaning of grain heap. Design, production and operation of rural cars Kirovohrad, 2002. Issue 32. P.117-121.

8. Petrenko N.N., Marchenko I.V., Marchenko K.N. Analysis of the grain separation process on a sieve in a pulsating air flow environment. Design, production and operation of agricultural machines. Kirovohrad, 2003. Issue 33. P.141-149.

9. Bogatyrev D. V. Justification of the parameters of the pneumatic pulse machine for the separation of seeds by density: diss. ... candidate technical Sciences: 05.05.11. Kirovohrad, 2005 176 p.

10. Kotov B. I., Stepanenko S. P. Study of the effect of a pulsating air flow on the movement of grain in a vibro-liquefied layer of a grain-straw pile.

Mechanization and electrification of agriculture. Glevakha, 2016. Vol. No. 4 (103). P.38-46.

11. Kotov B.I., Spirin A.V., Zozulyak O.V. Modeling and identification of the process of separation of small piles by vibration-air cleaning of a grain harvester / Technology, energy, transport of the agricultural industry. 2016. No. 4. P. 10-14.

12. Gortinsky V.V., Demskyi A.B., Boryskin M.A. Separation processes at grain processing enterprises. M.: Kolos, 1980. 304 p.

13. Omelyanov O. M., Tokarchuk O. A. Justification of amplitude-frequency characteristics and design parameters of a separator with a vibration drive for excitation of spatial oscillations. Vibrations in engineering and technology. No. 1 (104). 2022. P. 30-37.

14. Stepanenko S.P., Kotov B.I., Rud A.V., Zamriy M.A. Theoretical studies of the movement of grain material on the surface of a stepped vibratory feeder. Vibrations in engineering and technology. No. 2 (105). 2022. P. 25-32.

15. Dulaev V.G., Yatsevich G.V., Hortynskiy V.V. Analysis of vibrational and vibropneumatic separation of wheat grains of different density and vitreousness // Trudy VNII zema. 1986. Vol. 107. P. 84-91.

16. Kotov B.I. Vibropneumatic separation of seed mixtures // Herald of Agrarian Science. 2004. No. 5. P.55-58.

17. Kotov B.I. Identification of the parameters of the fluid medium in the vibro-liquefied layer based on experimental data // Collection of scientific papers of the NAU. K. 2003. Vol. XV. - with. 161 - 163.

18. Stepanenko S.P. Increasing the efficiency of vibropneumatic grain separators // Diss. ... candidate technical of science – Glevakha.: NSC "IMESG". - 2008. - 183 p.

19. Pyven M.V. Justification of the parameters of the sieve separation process of grain mixtures. Afterref. thesis Ph.D. technical of science Kh. 2006 - 24 p.

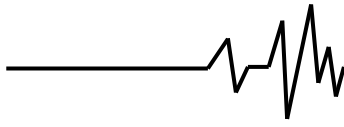
20. Bredykhin V.V. Justification of the process parameters of vibro-pneumocentrifugal separation of seed mixtures by seed density. Autoref. Diss. Ph.D. technical of science Kh. - 2003. 20 p.

21. Stepanenko S.P. Mechanical and technological substantiation of the processes and equipment of sieveless fractionation of grain materials: autoref. thesis for obtaining sciences. doctor's degree technical Sciences: 05.05.11 / S. P. Stepanenko. – Glevakha, 2021. – 50 p.

### MODELING THE PROCESS OF GRAIN SEPARATION BY DENSITY IN A COMBINED VIBRO-PNEUMATIC AND AIR-GRAVITY UNIT"

*It was established that the method of intensifying the course of the work process is the organization of supplying the layer with a pulsating*





flow of air. Using a pulsating air flow, it is possible to change the magnitude of the aerodynamic effect on the grain mass by changing the magnitude of the force pulse under conditions of constant speed. At the same time, the effect of the pulsating flow on the ability to move grains of different mass (density) will be different, which can intensify the separation of seeds by density. The study of the combined effect of vibrations and pulsating air flow on the stratification of the grain flow and separation by density is an important scientific and technical task.

The conducted analysis of publications revealed a promising possibility of using serial vibrating screen machines with a pneumatic system for the preparation of combined machines with a pneumatic system for the preparation of high-quality seeds, instead of vibro-pneumatic tables. To study the efficiency of the combined use of vibropneumoliquefied and pneumogravitational movement of the material.

It is substantiated that the intensifying effect of the pulsating flow consists in the different force of influence on light and heavy grains. The mathematical

description of the process of separation of loose material by density is based on the equations of motion of a particle in an oscillating medium, which is valid for any continuous medium that has the property of inertness.

Formulated mathematical models of the processes of movement of components of grain material in the vibro-liquefied layer and in the air channel of the vibro-pneumocleaning machine will allow to determine the trajectories of the movement of grains in the working zones and, based on their analysis, to justify the parameters of the working bodies.

The approbation of the mathematical description of the processes of separation of the components of grain material confirmed the increase in the efficiency of the use of pulsating flows for the separation of grain by density.

**Key words:** vibro-pneumatic, air-gravity unit, grain, vibration, variable speed, trajectory, coefficient of friction.

#### Відомості про авторів:

**Котов Борис Іванович** – доктор технічних наук, професор кафедри агроінженерії і системотехніки, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, 32316, e-mail: eetsapk@pdatu.edu.ua).

**Степаненко Сергій Петрович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу механіко-технологічних проблем збирання і післязбиральної обробки урожаю зернових та олійних культур, Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва (ІМА АПВ НААН) (вул. Вокзальна, 11/1 смт. Глеваха, Фастівський район, Київської обл. 08631, e-mail: [Stepsnenko\\_s@ukr.net](mailto:Stepsnenko_s@ukr.net)).

**Грушецький Сергій Миколайович** - кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії і системотехніки, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька обл., 32316, e-mail: [g.sergiy.1969@gmail.com](mailto:g.sergiy.1969@gmail.com)).

**Грищенко Володимир Олександрович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка, Національний університет біоресурсів та природокористування України (вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041. e-mail: [bepeck2001@rambler.ru](mailto:bepeck2001@rambler.ru)).

**Kotov Boris** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Agricultural Engineering and Systems Engineering, Institute of Higher Education "Podilskyi State University", (13 Shevchenka St., Kamianets-Podilskyi, 32316, e-mail: eetsapk@pdatu.edu. ua).

**Stepanenko Serhii** - Doctor of Technical Sciences, senior researcher, head of the department of mechanical and technological problems of harvesting and post-harvest processing of grain and oilseed crops, Institute of Mechanics and Automation of Agricultural Production (IMA APV NAAS) (Vokzalna St., 11/1, Glevakh , Fastivskyi district, Kyiv region 08631, e-mail: [Stepsnenko\\_s@ukr.net](mailto:Stepsnenko_s@ukr.net)).

**Grushetskyi Serhiy** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Agricultural Engineering and Systems Engineering, Institute of Higher Education "Podilskyi State University", (13 Shevchenka St., Kamianets-Podilskyi, Khmelnytskyi Region, 32316, e-mail: [g.sergiy.1969@gmail.com](mailto:g.sergiy.1969@gmail.com)).

**Hryshchenko Volodymyr** – candidate of technical sciences, senior lecturer of the Department of Automation and Robotic Systems named after Acad. I.I. Martynenko, National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine (15 Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041. e-mail: [bepeck2001@rambler.ru](mailto:bepeck2001@rambler.ru)).