

**Степаненко С. П.**

Д.Т.Н., С.Н.С.

*Національний науковий  
центр «Інститут  
механізації та  
електрифікації  
сільського  
господарства»*

**Котов Б. І.**

Д.Т.Н., професор

**Рудь А. В.**

К.Т.Н., професор

*Подільський державний  
аграрно-технічний  
університет*

**Замрій М.А.**

асистент

*Вінницький національний  
аграрний університет*

**Stepanenko S.**Doctor of Technical Sciences,  
Senior Researcher

*National Research Center  
"Institute of Mechanization  
and Electrification of  
Agriculture"*

**Kotov B.**Doctor of Technical Sciences,  
Professor**Rud A.**

PhD, Professor

*Podolsk State Agrarian  
Technical University*

**Zamrii M.**

assistant

*Vinnitsia National Agrarian  
University*

**УДК 631.362.3****DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-3**

## **ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РУХУ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ НА ПОВЕРХНІ СТУПІНЧАСТОГО ВІБРОЖИВИЛЬНИКА**

*Наведено математичний опис руху зернівок у складі компонентів зернового матеріалу (КЗМ) на поверхні ступінчастого віброживильника за умов введення КЗМ в аспіраційний канал сепаратора при дії вібрацій на КЗМ. Отримано траєкторії руху зернівок на поверхні віброживильника з різним розміром.*

*Отримане рівняння руху зернівки при дії вібрацій дозволяє визначити залежність швидкості руху матеріалу у шарі КЗМ від ряду факторів: геометричних параметрів віброживильника, кута подачі матеріалу, початкового кінематичного режиму зернового матеріалу, показника кінематичного режиму віброживильника, а також коефіцієнту тертя КЗМ.*

*Обґрунтовано процес руху зернового матеріалу на ступінчастій поверхні віброживильника, що дозволяє визначити раціональні параметри введення КЗМ в аспіраційний канал сепаратора та рівномірного його розподілу в каналі з подальшою можливістю його фракціонування.*

*Отримана залежність для функції швидкості потоку зернового матеріалу на ступінчастій поверхні віброживильника, що дозволяє визначити параметри розподілу зернового матеріалу за площею перетину аспіраційного каналу сепаратора.*

*Зроблено оцінку абсолютної швидкості руху зернового матеріалу на ступінчастій поверхні віброживильника на основі математичної моделі, побудованої за гідродинамічної аналогії, що в свою чергу зумовлює аналіз рекомбінації зернівок за товщиною віброзрідженого шару зернового матеріалу.*

*За встановленими математичними моделями було побудовано графічні залежності абсолютної швидкості руху від часу, траєкторії руху масиву частинок, розрахункові траєкторії частинок зернового матеріалу, які подаються в пневмоканаал за сталих початкових умов.*

*Ключові слова: ступінчастий віброживильник, зернівка, вібрація, змінна швидкість, траєкторія, коефіцієнт тертя.*

**Вступ.** Зерновий матеріал являє собою зерноматеріали після збирання мають значну поліфракційну за розміром, вологістю і кількістю домішок різного кількісного і якісного біологічним складом масу [1, 3, 4, 15], але складу. Отже задача ефективного очищення і



поділу зернових матеріалів на фракції різного споживчого призначення [8, 13, 14] (насіння, фураж, продовольче зерно) складає сутність проблеми підвищення технологічної ефективності очисних машин.

Поділ зернових матеріалів повітряними потоками є актуальним [15–20] і перспективним напрямком розвитку технологій та машинних засобів первинної післязбиральної обробки зерна [19, 20], яке в свою чергу залежить, як від умов введення зернового матеріалу в канали пневмосепараторів [2, 5, 6] так і від конструкційних та кінематичних режимів самих каналів [13-15]. Отже, встановлення і використання пристроїв введення зернового матеріалу на початкових стадіях, перед фракціонуванням матеріалу в аспіраційному каналі, забезпечує попереднє формування розпушеного, порційного зернового потоку [6, 7, 9], які з мінімальними втратами і енергозатратами забезпечують рівномірний розподіл зернового матеріалу за площею перетину аспіраційного каналу сепаратора.

**Актуальність проблеми.** Аналіз технічних характеристик сучасного устаткування для введення зернового матеріалу в зерноочисні машини та співставлення їх з вимогами якісного очищення і фракціонування зібраного урожаю свідчить про відсутність можливості здійснювати очищення і поділ зернового матеріалу застосуванням тільки одного типу робочих органів і необхідність створення нових принципів подачі на обробку зернових матеріалів [21].

Враховуючи, що вібраційні робочі органи дозволяють ефективно розташовувати шар зернового матеріалу з подальшим видаленням сміттєвих домішок та неповноцінного зерна, доцільним є їх використання в якості віброживильно-дозуючого пристрою в зерноочисних сепараторах.

Для визначення впливу ефективності такого агрегування робочих органів необхідно провести попередні теоретичні дослідження, шляхом математичного моделювання процесів переміщення зернівок матеріалу у вібраційному шарі.

Незважаючи на значну кількість наукових праць і винаходів в цьому напрямку можливості подальшого вдосконалення віброживильників для зернових матеріалів повністю не вичерпані.

**Аналіз останніх досліджень.** Удосконалення математичних моделей руху зернового матеріалу на плоскій поверхні віброживильника [1-4, 22] обумовлено необхідністю інтенсифікації введення зернових матеріалів в пневмосепаруючі канали з різною

геометрією (прямокутні, колові) та різним їх виконанням (вертикальні, горизонтальні, похилі). Для подальшого аналізу на першому етапі приймемо такі припущення [5-6]: перше - насіння будемо розглядати як кулі різного діаметра, друге - шар зерна, що вібрає на поверхні, розглядаємо, як неоднорідну в'язку «рідину».

У теоретичних дослідженнях поширені способи моделювання [7, 8, 11, 12], які засновані на аналогіях руху в'язкої рідини і сипучого середовища в умовах дії вібрацій, тому зазвичай використовують рівняння течії однорідної рідини без урахування зміни вібров'язкості суміші за товщиною рухомого шару, викликані зміною внутрішнього тиску. Для врахування цих змін замість класичних рівнянь гідродинаміки використовують рівняння течії неоднорідною рідини [9, 10, 22]. Тому вирішення таких рівнянь і побудова їх рішень відноситься до важливих науково-практичних завдань [15].

Слід відзначити роботи, що використовують гідродинамічну аналогію [4, 8, 13, 22], але в зазначених роботах, автори, систему рівнянь течії неоднорідної рідини зводили до одного рівняння, з якого і отримували рішення [4, 8]. Щоб з'ясувати сутність спрощень і внесені ними похибки потрібно скласти уточнену систему рівнянь [15, 16-18, 22], а також визначити її відмінності від класичних рівнянь Нав'є-Стокса.

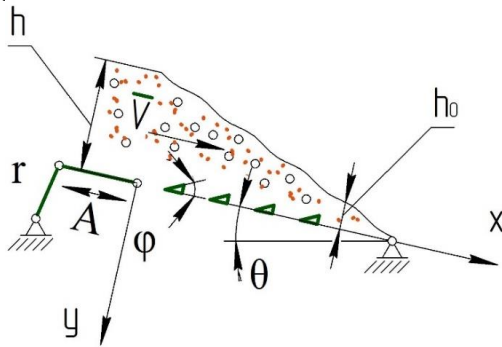
Отже, дані теоретичні дослідження направлені на складання і вирішення системи диференціальних рівнянь руху неоднорідної в'язкої рідини з спрощеннями, а також на побудову її аналітичних рішень в окремих випадках, які становлять інтерес при моделюванні руху зернового матеріалу на поверхні ступінчастого віброживильника.

**Формулювання мети дослідження.** Розробити математичну модель і розрахункові аналітичні залежності для визначення траєкторій і параметрів переміщення зернівок на поверхні ступінчастого віброживильника за умов його введення в аспіраційний канал сепаратора.

**Результати дослідження.** Для моделювання процесу введення зернового матеріалу на поверхні ступінчастого віброживильника з подальшою пневмосепарацією зернового матеріалу в висхідному повітряному потоці був обраний процес з подачею оброблюваного матеріалу в пневмоканап сходом з ступінчастого віброживильника (коливальної ступінчастої площини). Розглянемо абсолютний рух зерна по коливній площині, приймемо, що коливання відбуваються за законом  $z = r \cdot \sin(\omega \cdot t)$ , ступінчастий віброживильник розташовано під



кутом  $\alpha$  до горизонту (рис. 1).



**Рис. 1. Схема руху зернового матеріалу по колибній ступінчастій площині віброживильника**

На зерновий матеріал, відповідно до аналізу проведених досліджень, впливають наступні сили:

$$\text{вага } G = m \cdot g;$$

$$\frac{d(m\theta)}{dt} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \mp f \cdot (m \cdot g \cdot \cos \alpha + m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin \alpha) \quad (1)$$

Знак сили тертя залежить від напрямку відносної швидкості руху зернівки.

Після диференціювання отримаємо:

$$m \frac{d\theta}{dt} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \mp f \cdot (m \cdot g \cdot \cos \alpha + m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin \alpha) \quad (2)$$

Додаючи до рівняння (2) початкові умови  $\theta(0) = 0$ , отримуємо задачу Коші для звичайного диференційного рівняння першого порядку.

Особливістю даного розв'язку є факт зміни величини нормальної реакції і напрямку сили тертя в залежності від знака відносної швидкості частинок зернового матеріалу. У зв'язку з цим, це завдання необхідно вирішувати покроковим способом,

використовуючи кінцево-різницевий аналог рівняння. Похідну  $\frac{d\theta}{dt}$  представимо у вигляді:

$$\frac{d\theta}{dt} \approx \frac{\theta(t_{i+1}) - \theta(t_i)}{h} \quad (3)$$

де  $h = t_{i+1} - t_i$  – тобто крок в часі.

Тоді рівняння (2) поділивши  $m$  та з урахуванням (3) набуде вигляду:

$$\frac{\theta(t_{i+1}) - \theta(t_i)}{h} = g \cdot \sin \alpha \mp f \cdot [g \cdot \cos \alpha + r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t_i) \cdot \sin \alpha] \quad (4)$$

а для обчислювального алгоритму:

$$\theta(t_{i+1}) = \theta(t_i) + h \cdot (g \cdot \sin \alpha \mp f \cdot [g \cdot \cos \alpha + r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t_i) \cdot \sin \alpha]) \quad (5)$$

Якщо відносна швидкість зерна  $\dot{\theta}(t_i) - r \cdot \omega \cdot \cos \omega t_i > 0$ , то рівняння (5) прораховується зі знаком «-», в іншому випадку - зі знаком «+».

Перейдемо до чисельної реалізації цього завдання.

Для розрахунків кутову швидкість прийняли  $\omega = 40 \text{ с}^{-1}$ , яку можна порівняти з режимом роботи живильників більшості сучасних зерноочисних машин.

Нехай радіус кривошипа  $r = 0,015 \text{ м}$ , кутова швидкість  $\omega = 40 \text{ с}^{-1}$ , кут нахилу живильника  $\alpha = 9^\circ$ , крок часу для розрахунку  $h =$

$0,0002 \text{ с}$ , прискорення вільного падіння  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Перш за все, визначимо величину нормальної реакції  $N(t) = m \cdot g \cdot \cos \alpha + m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin \alpha$  (рис. 2).

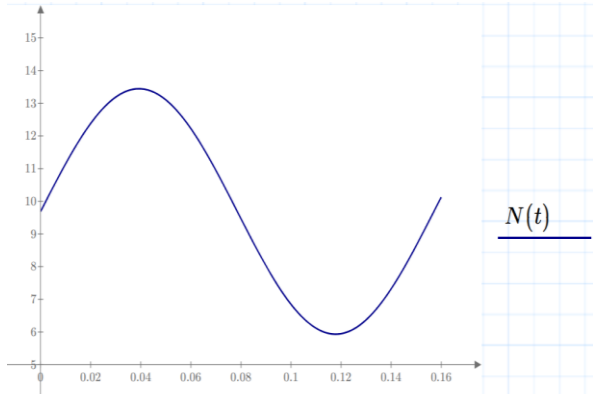
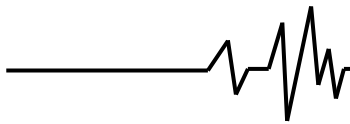


Рис. 2. Зміна нормальної реакції за період коливань

Як видно з рис. 2, значення нормальної реакції залишаються додатними за весь час

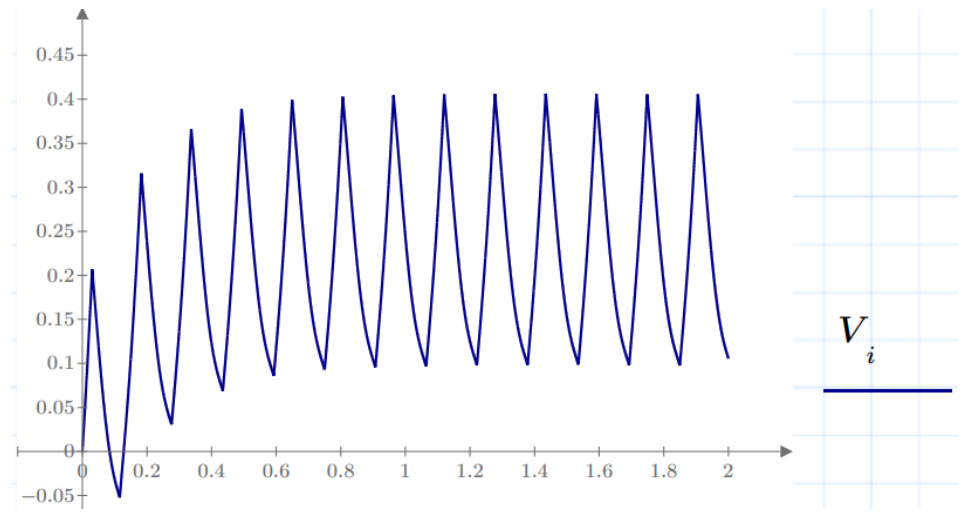


Рис. 3. Залежність абсолютної швидкості руху від часу

Визначивши швидкість руху зерна по віброуючій площині в залежності від часу, підставили її у вигляді діапазону в програму і зробити розрахунок.

Беручи до уваги відомі теорії пневмосепарації у висхідному повітряному потоці, для математичного моделювання введення зернового матеріалу з подальшим рухом у висхідному повітряному потоці вивели систему диференціальних рівнянь 6, що описують траєкторію польоту зернового матеріалу в зоні пневмосепарації:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -k \cdot \dot{x} \cdot \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \\ \ddot{y} = -k \cdot \dot{y} \cdot \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} - g + k \cdot V^2 \end{cases} \quad (6)$$

де:  $x$  і  $y$  - переміщення частинки по осях координат, м;  $k$  - коефіцієнт парусності частки,  $m^{-1}$ ;  $V$  - швидкість зернівки відносно повітряного потоку, м/с.

В результаті чисельного рішення системи диференціальних рівнянь (6) польоту

руху зернової маси по поверхні віброживильника, що означає відрив його від поверхні.

Далі формується оператор циклу, який в поєднанні з умовним оператором, який перевіряє знак відносної швидкості руху, послідовно визначає абсолютну швидкість руху зернового матеріалу.

На рис. 3 наведена залежність абсолютної швидкості від часу при початковій швидкості руху  $v(0) = 0,3$  м/с, як видно з даної графічної залежності, через проміжок часу менше 1 секунди характер зміни швидкості стабілізується в діапазоні 0,33-0,5 м/с.

зернівки з урахуванням опору повітря при наявності висхідного потоку, що має швидкість  $V$ , отримали траєкторії руху частинок зі знайденим розкидом швидкостей 0,33-0,5 м/с (рис. 4).

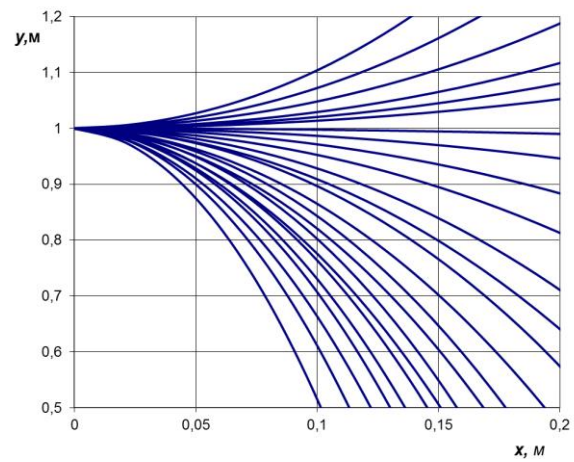


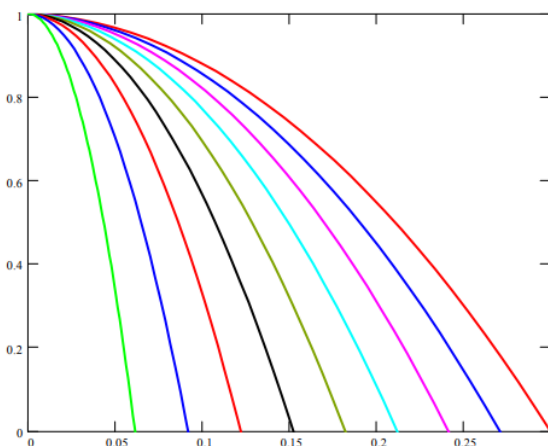
Рис. 4. Траєкторії руху масиву частинок



На рис. 4 показані траєкторії руху зернівок, за умов введення ступінчастим віброживильником зі знайденим розкидом швидкостей 0,33-0,5 м/с і коефіцієнтом парусності (вітрильності) в інтервалі 0,07-0,14 м<sup>-1</sup> при швидкості висхідного потоку повітря 9 м/с. Розрахунки показали, що зернівки з коефіцієнтом парусності більше 0,12 видуються в верхню частину аспіраційного каналу.

На рис. 4 видно, що частинки зернового матеріалу, що подаються в пневмосепаруючих канал сходом з поверхні ступінчастого віброживильника, розподіляються більш рівномірно тільки в області, протилежній точці введення. А безпосередньо в зоні завантаження маса надходить в канал розосередженим потоком, свого роду струменями, яка буде інтенсифікувати роботу висхідного повітряного потоку.

Виходячи з вищевикладеного можна зробити висновок, що підвищення ефективності пневмосепарації в системах повітряного очищення більшості серійних сепараторів, в яких подача оброблюваного матеріалу здійснюється сходом з коливної поверхні, можливо досягнути за рахунок рівномірного розподілу зернового матеріалу за площею пневмоканалу в даному випадку даний ефект забезпечується новою конструкцією ступінчастого віброживильника.



**Рис. 5. Розрахункові траєкторії частинок зернового матеріалу, які подаються в пневмоканал при початкових умовах:** парусність 0,06 м<sup>-1</sup>, швидкість повітряного потоку 9 м/с, кут введення 9°, початкова швидкість від 0,1 до 0,5 м/с з кроком 0,05 м/с

Більшість дослідників прийшли до висновку, що на траєкторію польоту частинок зернового матеріалу в пневмоканалі впливають такі параметри як: парусність компонентів суміші, початкові швидкість і кут введення оброблюваного матеріалу в зону сепарації і швидкість висхідного повітряного потоку. Швидкість висхідного повітряного потоку

обмежена якістю оброблюваного матеріалу і величиною втрат повноцінних зерен. Парусність компонентів зернового матеріалу, в свою чергу, залежить від складу оброблюваної суміші, на яку ми не можемо вплинути.

Для того, щоб траєкторії зернівок заповнювали пневмоканал рівномірно за його глибиною, необхідно змінювати один або кілька параметрів введення матеріалу в зону пневмосепарації.

Можна змінювати кут введення, але це доставить деякі труднощі при модернізації наявних машин, та й механізм подачі матиме складну конструкцію, що негативно позначиться на надійності зерноочисної машини в цілому.

Для того, щоб підвищити рівномірність розподілу зернового матеріалу за глибиною пневмосепаруючого каналу в системі аспірації сучасних зерноочисних машин, необхідно подавати зерновий матеріал в зону пневмосепарації з різною швидкістю, як показано на рис. 5.

**Висновки.** Описано процес руху зернового матеріалу на поверхні ступінчастого віброживильника, яка дозволяє визначити раціональні параметри введення матеріалу в аспіраційний канал сепаратора для подальшого його фракціонування.

Отримана залежність для функції швидкості потоку зернового матеріалу на поверхні ступінчастого віброживильника, яка дозволяє визначити параметри розподілу зернового матеріалу за площею перетину аспіраційного каналу сепаратора.

Зроблено оцінку швидкості зернового матеріалу на поверхні ступінчастого віброживильника на основі математичної моделі, побудованої за гідродинамічної аналогії, що в свою чергу зумовлює аналіз рекомбінації зернівок за товщиною віброзрідженого шару зернового матеріалу.

#### 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. Бутко В. П. Исследование плотности зерна пшеницы как перспективного показателя





технологических свойств. Автореф. дис. канд. техн. наук. М. 1973. 24 с.

6. Зенков Р. Л., Гриневич Г. П., Исаев В. С. Бункерные устройства. М. Машиностроение, 1977. 224 с.

7. Степаненко С. П., Котов Б. І. Математичне моделювання процесів поділу компонентів зернового матеріалу в комбінованому вібраційно-повітряному сепараторі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 2 (97). С. 51–61.

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

9. Гусак А. А., Гусак Г. М. Справочник по высшей математике: Справ. Мн.: Наука і техніка, 1991. 480 с.

10. Камке. Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М., 1965. 704 с.

11. Котов Б. І., Степаненко С. П., Калініченко Р. А. Теоретичне обґрунтування руху частинки зерна на вібропневморешеті при дії розпушуючих робочих органів. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. К., 2007. Вип. 115. С. 112–117.

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

13. Паламарчук І. П., Кюрчев С. В., Кюрчева Л. М. Дослідження динаміки руху насінини при виході з живильного конуса віброаспіраційного сепаратора. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2020. Вип. 8. Т. 2. С. 139–148.

14. Stepanenko S. P. Research pneumatic gravity separation grain materials. *Mechanization in Agriculture, conserving of the resources: International Scientific Journals of Scientific Technical Union of Mechanical Engineering «Industry 4.0»*. Bulgarian, 2017. Vol. 63. Issue 2. P. 54–56.

15. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження): монографія / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко, С. П. Степаненко, В. О. Швидя, В. О. Лісецький. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М. М., 2017. 552 с.

16. Stepanenko S. P., Kotov B. I. Pneumonitis fractionation of grain materials in air streams of variable structure. *An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. Lublin-Rzeszow. TEKA*. 2018. Vol. 18. No 2. P. 69–74.

17. Stepanenko S. P., Kotov B. I. Theoretical research of separation process grain mixtures. *An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. Lublin-Rzeszow. TEKA*.

2018. Vol. 18. No 3. P. 49–54.

18. Stepanenko S. P., Kotov B. I. Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2019. Vol. 10, N. 4. P. 137–143.

19. Stepanenko S. Особенности моделирования процессов сепарации зерна в условиях сепарации. *Motrol, Motoryzacja i energetyka rolnictwa*. Lublin. 2012. V. 3, N. 14. P. 148–157.

20. Степаненко С. П., Котов Б. І. Теоретичне визначення закономірностей плоского руху зернівки в нерівномірному повітряному потоці горизонтального пневмоканалу аеродинамічного сепаратора. *Механізація та електрифікація сільськогосподарства: [Загальнодержавний збірник]*. Глеваха, 2021. Вип. № 13 (112). С. 106–115. DOI:<https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-13-11>

21. Нестеренко О. В., Лещенко С. М., Петренко Д. І. Дослідження якісних показників пневмосепарації при багаторівневому введенні зерна. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст. ред.-вид. відділ ЛНТУ*. Луцьк, 2015. Вип. 32. С. 143–151.

22. Степаненко С. П., Котов Б. І., Грушецький С. М., Рудь А. В. Математичне моделювання руху зернового матеріалу на поверхні віброживильника за умов введення його в аспіраційний канал сепаратора. *«Вібрації в техніці та технологіях»*. Випуск № 2 (101). Вінниця, 2021. С. 46–55. DOI:10.37128/2306-8744-2021-2-5

### Reference

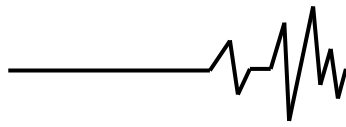
1. Vasilenko, P. M. (1960). Teoriya dvyzheniya chastyts po sherokhovatim poverkhnostiam selskokhoziaistvennikh mashyn. [Theory of particle motion on rough surfaces of agricultural machines]. 283 s. Kiev [in Ukrainian].

2. Blekhman, I. I., Dzhanelidze, G. Yu. (1964). Vybratsyonnoe peremeshchenye. [Vibration displacement]. 410 s. [in Russian].

3. Stutterer, P. M. (1998). Vybratsyonnoe peremeshchenye tverdikh y sipuchykh tel v selskokhoziaistvennikh mashynakh. [Vibration Displacement of Solids and Bulk Bodies in Agricultural Machines]. 625 s. [in Russian].

4. Tishchenko, L. N. (2004). Yntensyfykatsiya sepyarovaniya zerna. [Intensification of grain separation]. Osnova. 224 s. Kharkiv [in Ukrainian].

5. Butko, V. P. (1973). Yssledovanye plotnosity zerna pshenytsy kak perspektyvnoho pokazatelya tekhnolohycheskykh svoistv. [Investigation of wheat grain density as a promising indicator of technological properties]. *Abstract of thesis. dis. Cand. tech. sciences*. 24 s. [in Russian].



6. Zenkov, R. L., Grinevich, G. P., Isaev, V. S. (1977). Bunkernue ustroistva. [Bunker devices]. *Mechanical engineering*. 224 s. Moscow [in Russian].
7. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. (2020). Matematychnе modeliuвання protsesiv podilu komponentiv zernovoho materialu v kombinovanomu vibratsiino-povitriannomu separatori. [Mathematical modeling of processes of separation of grain material components in the combined vibration-air separator]. *Vibrations in Engineering and Technology*. Issue № 2 (97). S. 51-61. Vinnytsia [in Ukrainian].
8. Piven, M. V. (2006). Obosnovanye parametrov protsesa reshetnogo sepyrovaniya zernovukh smesei. [Substantiation of the parameters of the process of sieve separation of grain mixtures]. *Aftoref. dis. Cand. tech. sciences*. 24 s. [in Russian].
9. Gusak, A. A., Gusak, G. M. (1991). Spravochnyk po vushei matematyke. [Handbook of Higher Mathematics]. *Ref. Science and Technology*. 480 s. [in Russian].
10. Kamke, E. (1965). Spravochnyk po obuknovennum dyfferentsyalnum uravneniyam. [Handbook of Ordinary Differential Equations]. 704 s. [in Russian].
11. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., Kalinichenko, R. A. (2007). Teoretychne obgruntuvannya rukhu chastynky zerna na vibropnevmoresheti pry dii rozpushuiuchykh robochykh orhaniv [Theoretically, the debris of a grain of grain on a pneumatic pneumatic lattice with a set of firing robotic organs]. *Scientific Bulletin of the National Agrarian University*. Vip. 115. S. 112-117. [in Ukrainian].
12. Stepanenko, S. P. (2008). Pidvyshchennia efektyvnosti vibropnevmatychnykh separatoriv zerna. [Adjustment of efficiency of vibropneumatic grain separators]. *Dis. ... Cand. tech. sciences. NSC "IMESG"*. 183 s. Glevakha [in Ukrainian].
13. Palamarchuk, I. P., Kyurchev, S. V., Kyurcheva, L. M. (2020). Doslidzhennya dynamiki ruhu nasinini when going out from the living cone of the vibroaspiratsiy separator. [Doslidzhennia dynamiky rukhu nasyny pry vykhodi z zhyvlynoho konusa vibroaspiratsiinoho separatora]. *Naukoviy visnik TDATU*. Vip. 8. vol. 2. S. 139-148. [in Ukrainian].
14. Stepanenko, S. P. (2017). Research pneumatic gravity separation grain materials. *Mechanization in Agriculture, conserving of the resources: International Scientific Journals of Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "Industry 4.0"*. Vol. 63. Issue 2. S. 54-56. [in English].
15. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Stepanenko, S. P., Shvidya, V. O., Lisetsky, V. O. (2017). Modeliuвання tekhnolohichnykh protsesiv v typovykh ob'ektakh pisliazbyralnoi obrobky i zberihannya zerna (separatsiia, sushinnia, aktyvne ventyliuvannya, okholodzhennia). [Modeling of technological processes in typical procedures for processing and harvesting grain (separation, drying, active ventilation, cooling)]. *Monograph*. 552 s. Nizhyn [in Ukrainian].
16. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. (2018). [Pneumonitis fractionation of grain materials in air streams of variable structure]. *Energy Efficiency and Mechanical Engineering. TEKA*. Vol. 18. No 2. S. 69-74. [in English].
17. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. (2018). [Theoretical research of separation process grain mixtures]. *Energy Efficiency and Mechanical Engineering. TEKA*. Vol. 18. No 3, S. 49-54. [in English].
18. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. (2019). [Theoretical research of separation process grain mixtures]. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Vol. 10. No. 4. S. 137-143. [in English].
19. Stepanenko, S. (2012). Osobennosti modelirovaniya processov separatsii zerna. [Features of modeling grain separation processes under separation conditions]. *Motrol, Motoryzatsiia i energetyka rol'nictva*. Vip. 3, T. 14. S. 148-157. Lublin [in Russian].
20. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. (2021). Teoretychne vyznachennia zakonmironosti ploskoho rukhu zemivky v nerivnomirnomu povitriannomu pototsi horizontalnogo pnevmokanalu aerodynamichnogo separatora. [Theoretical definition of regularities of plane movement of grain in an uneven air stream of a horizontal pneumatic channel of an aerodynamic separator]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva*. Vip. № 13 (112). S. 106-115. [in Ukrainian].
21. Nesterenko, O. V., Leshchenko, S. M., Petrenko, D. I. (2015). Doslidzhennia yakisnykh pokaznykiv pnevmoseparatsii pry bahatorivnevomu vvedenni zerna. [Research of qualitative indicators of pneumoseparation at multilevel introduction of grain]. *Silskohospodarski mashyny: zb. nauk. st. red.-vyd. viddil LNTU*. Issue. 32. S. 143-151. [in Ukrainian].
22. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I., Hrushetsky, S. M., Rud, A. B. (2021). Matematychnе modeliuвання rukhu zernovoho materialu na poverkhnii vibrozhyvlynyka za umov vvedennia yoho v aspiratsiinyi kanal separatora. [Mathematical modeling of grain material movement on the surface of the vibrating feeder under the conditions of its introduction into the aspiration channel of the separator]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. Issue № 2 (101). S. 46-55. Vinnytsia [in Ukrainian].

#### THEORETICAL STUDIES OF THE PROCESS OF GRAIN MATERIAL MOVEMENT ON THE SURFACE OF THE STEPPED VIBRATING FEEDER

*A mathematical description of the movement of caryopses in the composition of the components of grain material (CGM) on the surface of a stepped vibrating feeder is given when CGM is introduced into*



the aspiration channel of the separator under the action of vibrations on the CGM. The trajectories of movement of grains on the surface of the vibrating feeder with different sizes were obtained.

The obtained equation of the movement of seeds under the action of vibrations makes it possible to determine the dependence of the speed of movement of the material in the CGM layer on a number of factors: the geometric parameters of the vibrating feeder, the angle of material feeding, the initial kinematic mode of the grain material, the indicator of the kinematic mode of the vibrating feeder, and the friction coefficient of the CGM.

The process of movement of grain material on the stepped surface of the vibrating feeder has been substantiated, which makes it possible to determine the rational parameters of introducing the CGM into the aspiration channel of the separator and uniform distribution in the channel with the subsequent possibility of its fractionation.

The dependence of the function of the flow rate of grain material on the stepped surface of the

vibrating feeder is obtained, which makes it possible to determine the parameters of the distribution of grain material over the sectional area of the aspiration channel of the separator.

The estimation of the absolute speed of grain material movement on the stepped surface of the vibrating feeder is made on the basis of a mathematical model constructed by hydrodynamic analogy, which in turn predetermines the analysis of the recombination of caryopses along the thickness of the vibrated layer of grain material.

According to the established mathematical models, graphical dependences of the absolute speed of movement on time, the trajectories of the array of particles, the calculated trajectories of particles of grain material, which are fed into the pneumatic channel under initial conditions, were built.

**Keywords:** stepped vibratory feeder, caryopsis, vibration, variable speed, trajectory, coefficient of friction.

#### **Відомості про авторів**

**Степаненко Сергій Петрович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу перспективних технологій і технічних засобів для збирання, обробки та зберігання врожаю зернових і олійних культур Національного наукового центру "Інститут механізації та електрифікації сільського господарства" (вул. Вокзальна, 11, смт. Глеваха, Васильківський район, Київська область, Україна e-mail: [Stepsnenko\\_s@ukr.net](mailto:Stepsnenko_s@ukr.net)).

**Котов Борис Іванович** – доктор технічних наук, професор кафедри агроінженерії і системотехніки Подільського державного аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, 32316, e-mail: [eetsapk@pdatu.edu.ua](mailto:eetsapk@pdatu.edu.ua)).

**Рудь Анатолій Володимирович** - кандидат технічних наук, професор, професор кафедри агроінженерії і системотехніки Подільського державного аграрно-технічного університету (32316, Хмельницька обл., м. Кам'янець-Подільський, вул. Шевченка, 13)

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

**Stepanenko Sergey** - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Advanced Technologies and Technical Means for Harvesting, Processing and Storage of Grain and Oilseeds Crops of the National Research Center "Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture" (11 Vokzalnaya St., town. Glevakha, Vasilkovsky district, Kiev region, Ukraine e-mail: [Stepsnenko\\_s@ukr.net](mailto:Stepsnenko_s@ukr.net)).

**Kotov Boris** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Agroengineering and Systems Engineering of Podolsk State Agrarian and Technical University (Shevchenko St., 13, Kamenets-Podolsky, 32316, e-mail: [eetsapk@pdatu.edu.ua](mailto:eetsapk@pdatu.edu.ua)).

**Rud Anatolii** - Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Agroengineering and Systems Engineering of Podolsk State Agrarian and Technical University (32316, Khmelnytsky region, Kamyanets-Podilsky, 13 Shevchenko str.)

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