

INVESTIGATION OF THE MOVEMENT OF GRAIN MATERIAL PARTICLES IN A VERTICAL CHANNEL UNDER THE ACTION OF AIR FLOW PULSATIIONS

S. Stepanenko^{1*}, B. Kotov², R. Kalinichenko³

¹National Scientific Center «Institute of Agricultural Engineering and Electrification», Glevakha, Ukraine

²Podillia State Agrotechnical University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

³SS National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine «Nizhyn Agrotechnical Institute», Nizhyn, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

ABSTRACT

Separation of grain mass in the air stream is one of the most common technological operations during post-harvest processing of grain. Most grain separators are equipped with air cleaning systems for grain mass. It is important to further improve the quality of grain separation into fractions by existing types of air separators. The creation of new and improvement of existing pneumatic separation systems is inextricably linked with the further development of the scientific basis of air separation and the creation of more accurate mathematical models that take into account the forces arising from changes in air flow rate, both coordinates and time. The action of forces on the grain due to the non-stationary flow of air and its unevenness under certain conditions can increase, or enhance, the efficiency of separation of the components of the grain material by aerodynamic properties. To study the process of moving grain material under the action of uneven, non-stationary air flow in the pneumatic separation channel, it is necessary to formulate a mathematical description that will determine the trajectories of grain in the air flow with a velocity gradient and pulsations. The article theoretically determines the regularities of grain motion and improves the mathematical model of the dynamics of solid grain motion in the vertical air flow, which differs from those known in that it takes into account the unevenness of the velocity field, the action of lateral forces, material concentration. The use of pulsed air flow allows us to increase the divergence of the trajectories of the grains by 10–15%. The solution of the system of equations with initial conditions is made in the form of trajectories of grain in vertical air flow, which allows us to calculate their trajectories differing in sailing coefficients and to determine rational values of design parameters of pneumatic gravity separators.

Key words:

grain separation,
pneumatic separator,
air flow,
air flow pulsation,
air flow velocity gradient

Article history:

Received 19.10.2021

Accepted 15.11.2021

*Corresponding author:

Stepanenko_s@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi47.619

To cite this article:

Stepanenko, S., Kotov, B., & Kalinichenko, R. (2021). Investigation of the movement of grain material particles in a vertical channel under the action of air flow pulsations. *Agricultural Machines*, 47, 25-36. <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.619>

УДК 631.362.3

ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ЧАСТИНОК ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ КАНАЛІ ЗА УМОВ ДІЇ ПУЛЬСАЦІЙ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ

С.П. Степаненко^{1*}, Б.І. Котов², Р.А. Калініченко³

¹Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», Глеваха, Україна

²Подільський державний аграрно-технічний університет,
Кам'янець-Подільський, Україна

³ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», Ніжин, Україна
«Nizhyn Agrotechnical Institute», Nizhyn, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES



СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

АНОТАЦІЯ

Створення нових і вдосконалення існуючих пневмосепаруючих систем пов'язано з подальшим розвитком теорії повітряного сепарування і створення точних математичних моделей, що урахують дію сил, які виникають при зміні швидкості повітряних потоків як за координатами, так і з часом. Дія на зернину сил, які зумовлені нестационарністю потоку повітря і його нерівномірністю, за певних умов може сприяти збільшенню ефективності розділення компонентів зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями. Для дослідження процесу переміщення зернового матеріалу, на який діє нерівномірний нестационарний потік повітря в пневмосепарувальному каналі, необхідно сформулювати математичний опис, який дозволить визначити траєкторії руху зернини в повітряному потоці із градієнтом швидкості і за наявності пульсацій. У статті теоретично визначені закономірності руху зернини та удосконалено математичну модель динаміки руху зернини у вертикальному потоці повітря, яка відрізняється від відомих тим, що урахує нерівномірність поля швидкості, дію бокових сил та концентрацію матеріалу. Застосування імпульсного потоку повітря дозволяє збільшити відхилення одна від одної траєкторій руху зернин на 10–15%. Розв'язок системи диференціальних рівнянь виконано у вигляді траєкторій руху зернин у вертикальному повітряному потоці, що дозволяє розраховувати їх траєкторії руху, які різняться коефіцієнтами парусності, та визначити раціональні параметри пневмогравітаційних сепараторів.

Ключові слова:

сепарування зерна,
пневмосепаратор,
повітряний потік,
пульсація повітряного потоку,
градієнт швидкості повітряного потоку

Історія публікації:

Отримано 19.10.2021

Затверджено 15.11.2021

*Автор для листування:

Stepanenko_s@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi47.619

Цитувати цю статтю:

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*, 47, 25-36. <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.619>

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Повітряне сепарування (очищення та розділення зернової маси) є однією із найбільш поширених технологічних операцій під час післязбирального оброблення зерна. Практично усі зернові сепаратори здійснюють повітряне очищення зернової маси. Досвід конструювання і практика експлуатації пневмосепараторів визначили напрям розвитку конструкцій пневмосепаруючого каналу. Як правило, це вертикальний повітряний канал прямокутного перетину із висхідним рухом повітряного потоку і низхідним гравітаційним переміщенням зерна. Із розвитком техніки повітряного сепарування пневмосепаруючі канали виокремилися в окремий клас зерноочисних і сортувальних машин.

Дослідженням процесу поділу зернового матеріалу у вертикальних пневмосепаруючих каналах присвячені фундаментальні наукові праці, аналіз яких дозволив отримати рекомендації щодо раціональних параметрів функціонування сепараторів для випадку очищення зернового матеріалу від легких і сміттєвих домішок. Подальше покращення якості поділу зерна на фракції існуючими типами повітряних сепараторів ускладнене, що можна пояснити причинами:

- зерновий матеріал взаємодіє із повітряним потоком короткої проміжок часу;
- швидкість повітря в поперечному перетині каналу розподілена нерівномірно, зокрема у пристінкових зонах практично відсутній потік повітря;
- технологічні можливості повітряного потоку використовуються не в повному обсязі;
- не ефективне використання нижньої частини (відносно введення матеріалу в повітряний потік) пневмосепарувального каналу – вихід однієї фракції;
- кінематичні режими розраховуються на основі співвідношення сил тяжіння, інерції та аеродинамічного опору.

Створення нових та вдосконалення існуючих пневмосепаруючих систем пов'язано з подальшим розвитком теоретичних основ повітряного сепарування і створення більш точних математичних моделей, які враховують дію сил, що виникають при зміні швидкості повітряних потоків як за координатами, так і з часом. Дія на зернину сил, зумовлених нестационарністю потоку повітря та його

нерівномірністю, за певних умов може сприяти збільшенню ефективності розділення компонентів матеріалу за аеродинамічними властивостями.

Для дослідження процесу переміщення зернового матеріалу під дією нерівномірного і нестационарного потоку повітря в пневмосепарувальному каналі необхідно зробити математичний опис, який дозволить визначити траєкторії руху зернин в повітряному потоці з градієнтом швидкості і за наявності пульсацій.

Основи теорії, принципи функціонування, методи розрахунку і конструювання технічних засобів для сепарування зернових матеріалів у повітряних каналах висвітлені у наукових працях Борискина М.А., Гортинського В.В., Ветрова Е.Ф., Демідова А.Р., Демського А.Б., Маліса А.Я., Нелюбова О.І. та інших, які проаналізовано в праці (*Котов та ін., 2017*). У науковій праці (*Бурков & Сычугов, 2000*) проаналізовані конструкції пневмосепаруючих систем та подано розрахунок живильних пристроїв пневмоканалу. Крім того, проблема повітряного сепарування розглядалася в наукових працях (*Bulgakov et al., 2020; Nesterenko et al., 2017; Piven et al., 2018; Rogovskii et al., 2019a; Rogovskii et al., 2019b; Vasylykovskiy et al., 2019; Кюрчев, 2019; Степаненко & Котов, 2018a*). У наукових працях (*Борщ, 2014; Нестеренко, 2017*) обґрунтована доцільність багаторівневого введення матеріалу в канал механічним і аеродинамічним способами. У праці (*Колодій, 2015*) запропоновано використовувати нижню зону вертикального пневмоканалу сепаратора для розділення зерна на фракції, а також доведена доцільність зміни швидкості повітря за висотою (довжиною) каналу. У праці (*Абдуєв, 2007*) встановлена доцільність зміни швидкості повітря за висотою похилого каналу.

В усіх опрацьованих наукових працях рух частинки зернового матеріалу в повітряному середовищі моделюється системою рівнянь руху зернини в рівномірному та стаціонарному потоці, які складені Василенком П.М. Для випадку руху частинки матеріалу в повітряних каналах із нерівномірним полем швидкостей в перетині каналу складені математичні моделі у наукових працях (*Степаненко & Котов, 2018a; Степаненко & Котов, 2018b; Котов & Степаненко, 2020a*). У праці (*Злочевський, 1986*) встановлено негативний вплив на розділення зернового матеріалу поперечних

сил Магнуса та Жуковського.

На сьогодні є поширеним використання імпульсного повітряного потоку для інтенсифікації процесів поділу зернового матеріалу в повітряно-решітних машинах (Петренко та ін., 2002; Богатирьов, 2005; Котов & Степаненко, 2016). У праці (Степаненко та ін., 2017) для періодичної зміни швидкості повітряного потоку використовується кільцевий зигзагоподібний канал. У праці (Кюрчев, 2019), а потім і в працях (Bulgakov et al., 2020; Гудков, 1963) запропоновано використовувати коливальний рух внутрішнього циліндра кільцевого каналу, на якому розташовані парусні елементи. На думку авторів, обертальні коливання циліндра з парусними елементами створюють «силу опору в радіальному напрямку». Також у математичній моделі руху зернини, яку склали автори, силу дії повітряного потоку включено в рівняння руху як «переносну», а в радіальному напрямку діє «гармонічна» сила опору (знакозмінна), яка, начебто, створює додаткові повітряні потоки, що в рівняннях не визначені. З огляду на аналіз цієї математичної моделі, питання щодо доцільності використання «радіального потоку» є дискусійним.

Разом із тим, у працях (Нелюбов & Ветров, 1977; Ландау & Лифшиц, 1953) визначена доцільність використання імпульсних потоків повітря для підвищення аеродинамічних ознак поділу зернового матеріалу. Так, у праці (Нелюбов & Ветров, 1977) показано, що у випадку пульсуючого потоку на тіло діє більша сила опору внаслідок того, що опір руху в нестационарному потоці обумовлений інерційністю самого тіла, а також зміною кінетичної енергії потоку. Наукові результати попередніх досліджень вказують на доцільність проведення теоретичного аналізу впливу пульсуючого повітряного потоку на переміщення зернини в пневмосепаруючих каналах та визначення траєкторії її руху і ефективності розділення компонентів зернового матеріалу.

Мета дослідження – підвищення ефективності поділу зернового матеріалу в пневмосепаруючих каналах сепараторів шляхом застосування пульсацій повітряного потоку.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Теоретичні дослідження, що передбачали визначення закономірності руху зернини в пульсуючому повітряному потоці, базувалися на положеннях теорії пневмосепарування сипких матеріалів і передбачали використання аналітичного методу із складанням рівнянь руху зернин сферичної форми в повітряному потоці пневмосепаруючого каналу сепаратора. Під час математичного моделювання руху компонентів зернового матеріалу зернину приймали за матеріальну точку та враховували комплексний показник її аеродинамічних властивостей (коефіцієнтом парусності).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Розглянемо вертикальний повітряний канал із нижнім сходом розділеного зернового матеріалу. Форма поперечного перетину каналу може бути прямокутною чи кільцевою. Завантаження зернового матеріалу у канал відбувається від бокової стінки або від внутрішнього циліндра під кутом α_0 із початковою швидкістю \mathcal{G}_0 (рис. 1, а).

Траєкторія руху зернини розглядається в площині прямокутної системи координат xOy (рис. 1, б). На рис. 1, б також зображені швидкості і сили, які діють на зернину в повітряному потоці. Швидкість повітряного потоку в поперечному перетині каналу сепаратора змінюється за степеневим законом і визначається за турбулентного режиму згідно формули (Зусєв, 1979):

$$\mathcal{G}(x) = \mathcal{G}_{\max}(t) \left[\frac{x}{b} \right]^{1/7}; \quad (1)$$

де $\mathcal{G}_{\max}(t)$ – змінна швидкості повітряного потоку в центрі каналу з часом; b – половина відстані між стінками каналу; x – відстань від зернини (матеріальної точки) до стінки каналу.

Нехай, зміна швидкості повітря з часом у першому наближенні відбувається за гармонійним законом:

$$\mathcal{G}(x) = A(1 - \sin(\omega t)); \quad (2)$$

де A – амплітуда коливань; ω – частота коливань (частота обертання дволопатевого ротора).

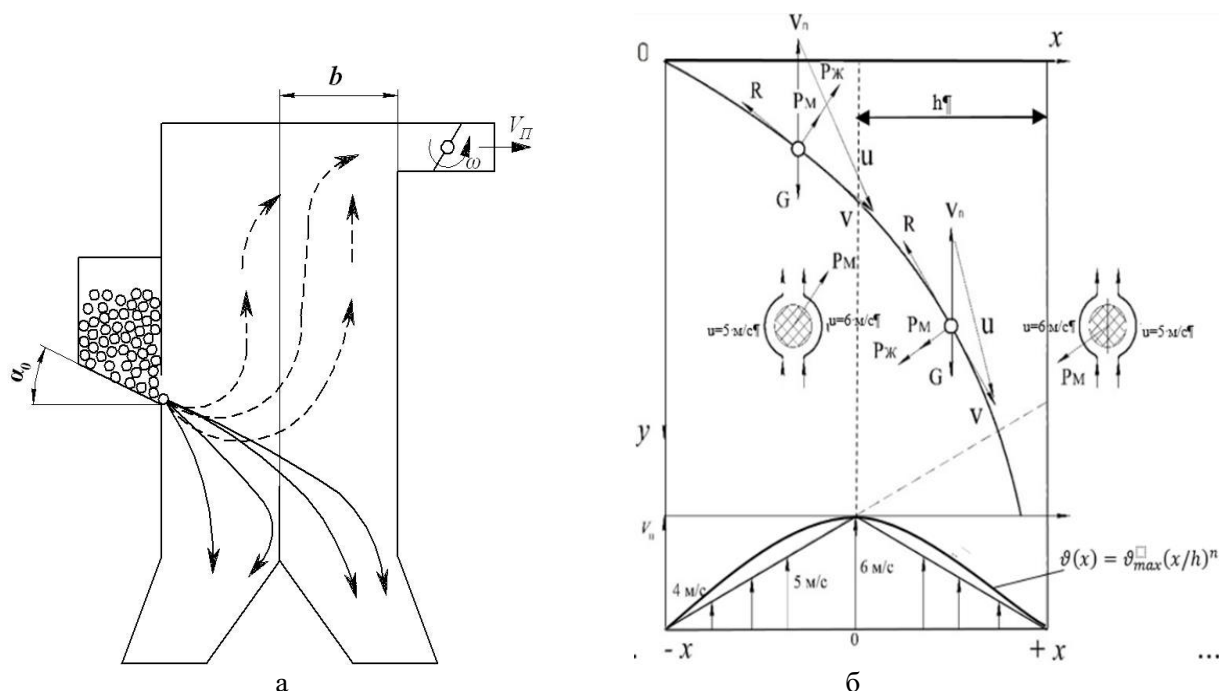


Рис. 1 – Схеми пневмогравітаційного сепаратора (а) та силової взаємодії зернини із повітряним потоком (б)

Визначимо сили, які діють на зернину сферичної форми у потоці повітря. Основу детермінованої моделі становить, як правило, представлення процесу у вигляді руху незважених зернин у нерівномірному нестационарному потоці повітря, обмеженому стінками каналу (взаємодія зернини із стінкою каналу виключається). У цьому випадку математична модель переміщення зернини визначається сукупністю рівнянь:

- диференціальне рівняння руху зернини:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \sum \vec{F} \text{ та } \vec{V} = \frac{d\vec{S}}{dt}; \quad (3)$$

де $\sum \vec{F}$ – сума векторів сил, які діють на зернину; \vec{V} , \vec{S} – відповідно, вектори швидкості та переміщення зернини масою m ;

- поле швидкостей несучого потоку:

$$\vec{V}_n = \vec{V}(x); \quad (4)$$

- рівняння зміни швидкості повітряного потоку з часом:

$$\vec{V}_n = \vec{V}(t) \text{ та } \vec{V}_n = \vec{V}(x, t). \quad (5)$$

Початкові умови для розв'язування рівнянь (3)–(5): $V = V_0$; $S = S_0$; $\alpha = \alpha_0$.

Розглянемо сили, які діють на зернину в повітряному потоці. Сила тяжіння, що діє на зернину, визначається за формулою:

$$\vec{G} = m\vec{g} = V_3 \rho_3 \vec{g}; \quad (6)$$

де ρ_3 – густина зернини; g – прискорення вільного падіння; m – маса зернини; V_3 – об'єм зернини.

Об'єм зернини розраховується за формулою:

$$V_3 = \frac{\pi d_e^3}{6}; \quad (7)$$

де d_e – еквівалентний діаметр зернини.

Сила Архімеда, що діє на зернину, яка спрямована протилежно силі тяжіння:

$$\vec{F}_a = V_{об.0} \rho_0 \vec{g}; \quad (8)$$

де $V_{об.0}$, ρ_0 – відповідно, об'єм повітря, що виштовхує зернину вгору, та його густина.

Сила в'язкого опору, яка виникає під час руху зернини з відносною швидкістю $\vec{u} = \vec{V}_n - \vec{V}$, що визначається за формулою:

$$\bar{R} = 0,5 \cdot \xi(\text{Re}) \cdot S_m \rho_0 (\bar{V}_n - \bar{V}) |\bar{V}_n - \bar{V}|; \quad (9)$$

де \bar{V}_n , \bar{V} – відповідно, швидкість повітря і зернини; $\xi(\text{Re})$ – коефіцієнт аеродинамічного опору, величина якого визначається числом Рейнольдса $\text{Re} = \frac{du}{\nu}$; $S_m = \frac{\pi d_e^2}{4}$ – площа міделевого січення зернини; $d_e = 2r$ – еквівалентний діаметр зернини сферичної форми; r – еквівалентний радіус зернини; u – швидкість обтікання зернини повітряним потоком; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря.

На зернину також діє бічна сила Жуковського (підйомна сила), що виникає за наявності градієнта швидкості повітряного потоку, який обтікає зернину. Відповідно до степеневого закону розподілу швидкості повітряного потоку (1), величина градієнта визначається (Зуєв, 1979):

$$\begin{aligned} \text{grad} V_n(x) &= \frac{dV(x)}{dx} = \\ &= \frac{1}{7} g_{\max}(t) b^{-\frac{1}{7}} x^{-\frac{6}{7}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Відносна швидкість руху зернини:

$$\bar{u} = \left[g_{\max}(t) \left(\frac{x}{b} \right)^{\frac{1}{7}} \bar{i} - V(x) \right]; \quad (11)$$

де \bar{i} – одиничний вектор осі x .

Бічна сила визначається за теоремою Жуковського М.Е.:

$$P_{\text{Ж}} = \rho_0 \bar{u} \Gamma; \quad (12)$$

де $\Gamma = \frac{4}{3} \pi r^2 \text{grad} V(x)$ – циркуляція повітря вздовж колового контуру (Зуєв, 1979).

Після перетворень в (12), матимемо:

$$\begin{aligned} P_{\text{Ж}} &= \frac{4}{21} \pi r^3 \rho_0 g_{\max}(t) b^{-\frac{1}{7}} x^{-\frac{6}{7}} \times \\ &\times \left[g_{\max}(t) \left(\frac{x}{b} \right)^{\frac{1}{7}} \bar{i} - V(x) \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Сила від ефекту Магнуса виникає під час обертання зернини навколо своєї осі у нерівномірному нестационарному потоці повітря (Котов & Степаненко, 2020b):

$$\begin{aligned} P_M &= \frac{16}{3} r^3 \pi \rho_0 \omega_3 \times \\ &\times \left[g_{\max}(t) \left(\frac{x}{b} \right)^{\frac{1}{7}} \bar{i} - V(x) \right]; \end{aligned} \quad (14)$$

де ω_3 – кутова швидкість обертання зернини.

Вектор сили $P_{\text{Ж}}$ спрямований нормально до вектора відносної швидкості руху зернини в бік збільшення швидкості повітря. Вектор сили P_M спрямований нормально до вектора відносної швидкості руху зернини у бік, де вектор швидкості повітря співпадає з напрямком обертання зернини.

Інтенсифікуюча дія імпульсів повітряного потоку полягає у виникненні змінної аеродинамічної сили, що призводить до появи додаткової сили від так званих «приєднаних мас» нестационарного потоку, завдяки чому повна сила, що діє на зернину, буде дорівнювати (Нелюбов & Ветров, 1977; Ландау & Лифшиц, 1953):

$$F_{n.c.} = V_{об.0} \rho_0 \frac{d\bar{V}_{ni}}{dt} - m_i \frac{d}{dt} [\bar{V}_{ni} - \bar{V}]; \quad (15)$$

де m_i – тензор приєднаних мас; \bar{V}_n – вектор швидкості повітряного потоку.

Прирівнявши цю силу до похідної за часом від імпульсу зернини, отримаємо рівняння руху зернини в імпульсному (коливному) повітряному потоці (Зуєв, 1979):

$$\frac{d}{dt} m_i \bar{V}_i = V_{об.0} \rho_0 \frac{d\bar{V}_{ni}}{dt} - m_i \frac{d}{dt} [\bar{V}_{ni} - \bar{V}]. \quad (16)$$

До сил, що діють на зернину, за умови її взаємодії із нестационарним (імпульсним) повітряним потоком, в праву частину рівняння (3) необхідно додати:

- силу, що зумовлена зміною швидкості (тиску) у напрямку руху потоку повітря за рахунок його прискорення:

$$\bar{F}_1 = m_0 \frac{d\bar{V}_n}{dt}; \quad (17)$$

- силу, що еквівалентна впливу прискорених мас:

$$\bar{F}_2 = m_i \frac{d}{dt} [\bar{V}_{ni} - \bar{V}]. \quad (18)$$

Підставляючи визначені сили, що діють на зернину в імпульсному рухомому потоці повітря, в рівняння (3), матимемо диференціальне рівняння руху зернини в нерівномірному пульсуючому потоці повітря у векторній формі:

$$(m + m_i) \frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{R} + \bar{G} + \bar{P}_M + \bar{P}_Ж + \bar{F}_1; \quad (19)$$

де m_i – тензор приєднаної маси, який визначається $m_i = 3,75\pi r^3 \rho_0 \delta_i$; δ_i – одиничний тензор; F_1 – сила інерції повітряного потоку.

Сила інерції повітряного потоку в узагальненому вигляді:

$$\bar{F}_1(t, x) = (m_0 + m_i) \frac{d\bar{V}_n(t)}{dt}; \quad (20)$$

$$\frac{d\bar{V}_n(t)}{dt} = A\omega \cos(\omega t) \left(\frac{x}{b}\right)^{\frac{1}{7}}. \quad (21)$$

Ураховуючи, що у двофазному зерно-повітряному потоці площа вільного січення S_n для руху повітря визначається площинною пористістю зерно-повітряної суміші $\varepsilon = S_n / S_3$ (де S_3 – площа перекриття січення зерном), то швидкість руху повітря у міжзерновому просторі становитиме:

$$g_{\max}^* = \frac{g_{\max}}{\varepsilon}. \quad (22)$$

У теоретичних дослідженнях (Бурков & Сычугов, 2000; Котов та ін., 2017; Нестеренко, 2017) прийнято ознакою поділу вважати швидкість витання компонентів зернового матеріалу, що зв'язана із коефіцієнтом парусності співвідношенням (Нелюбов & Ветров, 1977):

$$k_V = \frac{\xi(\text{Re}) \rho_0 S_M}{2m}. \quad (23)$$

Відповідно, силу аеродинамічного опору визначимо за формулою:

$$\bar{R} = mk_V \bar{u}^2(t) = mk_V (\bar{V}_n(x, t) - \bar{V})^2; \quad (24)$$

$$\bar{V}_n(x, t) = g_{\max}(t) \left(\frac{x}{b}\right)^{\frac{1}{7}} = A(1 - \sin(\omega t)) \left(\frac{x}{b}\right)^{\frac{1}{7}}. \quad (25)$$

Підставляючи значення визначених сил у рівняння (19) та спроектувавши сили на осі системи координат xOy , матимемо систему диференціальних рівнянь, які описують рух зернини в нестационарному нерівномірному повітряному потоці вертикального каналу:

$$\begin{cases} (m + m_i) \frac{dV_x}{dt} = -R \sin \alpha \pm P_{M(x)} \cos \alpha \pm \\ \pm P_{Ж(x)} \cos \alpha; \\ (m + m_i) \frac{dV_y}{dt} = mg - R \cos \alpha \pm P_{M(y)} \sin \alpha \pm \\ \pm P_{Ж(y)} \sin \alpha - F_1(t, x); \end{cases} \quad (26)$$

де $V_x = \frac{dx}{dt}$; $V_y = \frac{dy}{dt}$; $\sin \alpha = \frac{V_x}{u}$; $\cos \alpha = \frac{V_x + V_n(x, t)}{u}$; $u = \sqrt{(V_n + V_y)^2 + V_x^2}$; u – відносна швидкість руху зернини в потоці; α – кут між вектором абсолютної швидкості зернини і віссю x .

Подвійні знаки перед бічними силами означають зміну напрямку вектора сили при перетині зерниною осі симетрії каналу, які визначаються граничними умовами в точці $x = 0$. Проекції бічних сил $P_{Ж(x)}$, $P_{M(x)}$, $P_{Ж(y)}$, $P_{M(y)}$ та $F_1(t, x)$ за модулем:

$$P_{Ж(x)} = \frac{4}{21} \pi \rho_0 r^3 A \omega (\cos(\omega t)) b^{\frac{1}{7}} x^{-\frac{6}{7}} V_x; \quad (27)$$

$$P_{M(x)} = \frac{8}{3} \pi \rho_0 r^3 \omega V_x; \quad (28)$$

$$P_{Ж(y)} = \frac{4}{21} \pi \rho_0 r^3 A \omega (\cos(\omega t)) \times \left[A \omega (\cos(\omega t)) \left(\frac{y}{b}\right)^{\frac{1}{7}} - V_y \right]; \quad (29)$$

$$P_{M(y)} = \frac{8}{3} \pi \rho_0 r^3 \omega \left[A \omega (\cos(\omega t)) \left(\frac{y}{b}\right)^{\frac{1}{7}} - V_y \right]; \quad (30)$$

$$F_1(t, x) = (m_0 + m_i) \left(A \omega (\cos(\omega t)) \left(\frac{x}{b} \right)^{\frac{1}{7}} \right). \quad (31)$$

Початкові та граничні умови для розв'язування системи рівнянь (27)–(31):

$$\frac{dx}{dt_{t=0}} = V_0 \cos \alpha_0; \quad \frac{dy}{dt_{t=0}} = V_0 \sin \alpha_0;$$

якщо $x \leq 0$, тоді $P_{Ж} > 0$ та $P_M > 0$;

якщо $x > 0$, тоді $P_{Ж} < 0$ та $P_M < 0$;

$$-(x) \leq x \leq (x - r). \quad (32)$$

Тоді система рівнянь (27)–(31) буде:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = & -\frac{k_V m}{m + m_i} \left(\frac{dx(t)}{dt} \right) \times \\ & \times \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} + V_n(x, t) \right)^2} + \\ & + \frac{(P_{Ж(x)} + P_{M(x)})}{m + m_i} \times \\ & \times \frac{\frac{dx(t)}{dt}}{\sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} + V_n(x, t) \right)^2}}; \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = & \frac{mg}{m + m_i} - \frac{k_V m}{m + m_i} \times \\ & \times \left(\frac{dy(t)}{dt} + V_n(x, t) \right) \times \\ & \times \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} + V_n(x, t) \right)^2} + \\ & + \frac{(P_{Ж(y)} + P_{M(y)})}{m + m_i} \times \\ & \times \frac{\frac{dy(t)}{dt} + V_n(x, t)}{\sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} + V_n(x, t) \right)^2}} + \\ & + \frac{m_0 + m_i}{m + m_i} \left(A \omega (\cos(\omega t)) \left(\frac{x}{b} \right)^{\frac{1}{7}} \right). \end{aligned} \quad (34)$$

Відомо, що лінії дії сил $P_{Ж}$ та P_M проходять через центр мас зернини, тоді величина моменту, що діє на зернину, буде визначатися силою аеродинамічного опору та її плечем відносно центра мас. Величина цього плеча $a_{(x)}$ відповідно до (Зуєв, 1979) змінюється за координатою за лінійним законом:

$$a_{(x)} = 0,125 \frac{r(b-x)}{(b-r)}. \quad (35)$$

Тоді зміну кутової швидкості обертання зернини в повітряному потоці можна описати диференціальним рівнянням:

$$\begin{aligned} I \frac{d\omega}{dt} = & 0,0625 k_V m \frac{\pi \rho_0 r^3 (b-x)}{(b-r)} \times \\ & \times \left(A \omega (\cos(\omega t)) \left(\frac{x}{b} \right)^{\frac{1}{7}} - V_x \right)^2. \end{aligned} \quad (36)$$

Розрахунки за рівнянням (36) показують, що за відсутності початкового обертання зернини $\omega_0 = 0$, вона дуже повільно набирає оберти за рахунок градієнта швидкості, тому, за заданої початкової швидкості обертання $\omega_0 = \omega$, функцію $\omega(t)$ можна визначити за спрощеною формулою (Котов & Степаненко, 2020b):

$$\omega(t) = \omega_0 e^{-kt}; \quad (37)$$

де $k = 15 \frac{\mu}{\rho_0 r^3}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря.

Розв'язок системи рівнянь (32) та (33) з початковими і граничними умовами отримано чисельним методом у комп'ютерному середовищі MathCAD у вигляді траєкторій руху зернин, які відрізняються масою і коефіцієнтом парусності. На **рис. 2** та **рис. 3** представлені графічні залежності $x(y)$, тобто траєкторії руху зернин, що різняться масою та швидкістю витання за стаціонарного і пульсуючого режиму. Із графіків очевидно, що траєкторій руху зернин із різними значеннями k_V відрізняються, тим самим досягається можливість поділу компонентів за низхідного руху зернин у вертикальному каналі.

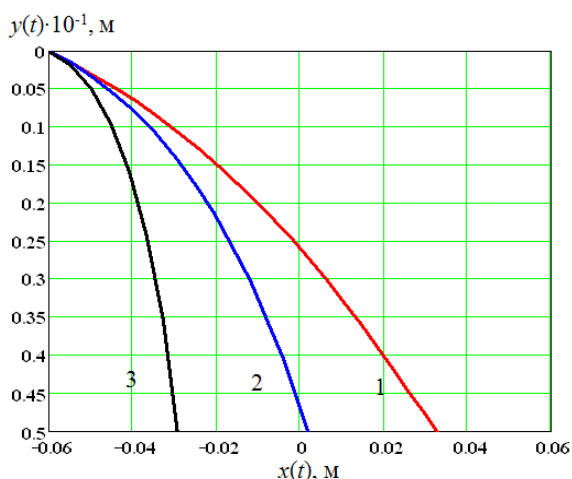


Рис. 2 – Траєкторії руху зернин у стаціонарному нерівномірному потоці повітря:
 1 – $k_V = 0,39$; 2 – $k_V = 0,184$; 3 – $k_V = 0,139$

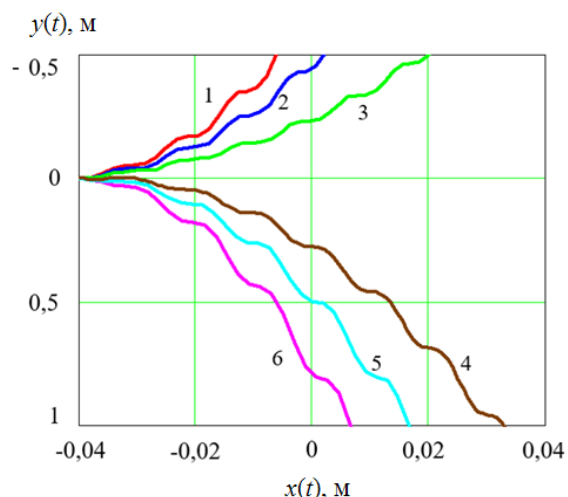


Рис. 3 – Траєкторії руху зернин у пульсуючому нерівномірному потоці повітря:
 1 – $k_V = 0,38$; 2 – $k_V = 0,34$; 3 – $k_V = 0,3$;
 4 – $k_V = 0,18$; 5 – $k_V = 0,13$; 6 – $k_V = 0,06$

Крім того, встановлена можливість впливу дії окремих сил і режимів процесу сепарування на траєкторії зернин, чим можна впливати на ефективність поділу. Із аналізу траєкторій випливає, що дія бічних (поперечних) сил негативно впливає на величину відхилення одна від одної траєкторій зернин, тобто відстань між траєкторіями зменшується. За відсутності дії бічних сил відхилення одна від одної траєкторій зернин збільшується. Таким чином, встановлено, що застосування імпульсного потоку повітря дає можливість

збільшити відхилення одна від одної траєкторій руху зернин.

Для визначення доцільності застосування для пневмогравітаційного фракціонування додаткового пульсуючого потоку повітря в горизонтальному напрямку у наукових працях (Stepanenko & Kotov, 2018a; Stepanenko & Kotov, 2018b; Stepanenko & Kotov, 2019; Кюрчев, 2019; Степаненко, 2021; Степаненко та ін., 2017) пропонується розглянути виключно теоретичний варіант гіпотетичної моделі пневмоканалу, яка представлена на **рис. 4**, в якому відбувається переміщення зернин у вертикальному рівномірному потоці за наявності пульсацій в горизонтальному напрямку. Нехай, потоки повітря рухаються у взаємно перпендикулярних напрямках, а вертикальний потік стаціонарний рівномірний і спрямований проти осі у. Припускаємо, що горизонтальний потік повітря рівномірний у січенні і змінюється з часом за законом:

$$V_n(x) = A\omega(1 + \sin(\omega t)). \quad (38)$$

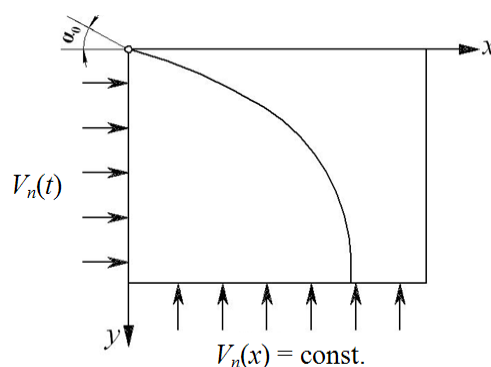


Рис. 4 – Розрахункова схема моделі пневмоканалу

Рух зернин як сферичних тіл із незмінною формою і масою опишемо за допомогою системи диференціальних рівнянь:

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -k_{1V} \left(A\omega(1 + \sin(\omega t)) - \frac{dx(t)}{dt} \right) \times \left[\left(A\omega(1 + \sin(\omega t)) - \frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} + V_n(y, t) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{m_0 + m_i}{m + m_i} (A\omega \cos(\omega t)); \quad (39)$$

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} = \frac{mg}{m + m_i} - k_{1V} \left(\frac{dy(t)}{dt} + V_n(x, t) \right) \times \left(\left(A \omega (1 + \sin(\omega t)) - \frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} + V_n(y, t) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (40)$$

де $k_{1V} = k_V \frac{m}{m + m_i}$; $V_n(y, t)$ – швидкість

висхідного повітряного потоку.

Початкові умови для розв’язування рівнянь (39) та (40):

$$\frac{dx}{dt_{t=0}} = V_0 \cos \alpha_0; \quad \frac{dy}{dt_{t=0}} = V_0 \sin \alpha_0; \quad t = 0; \quad x = x_0; \quad y = 0; \quad (41)$$

де α_0, V_0 – кут і швидкість введення зернин у повітряний канал сепаратора.

Система рівнянь (39) та (40) записана із урахуванням припущення, що сила аеродинамічного опору пропорційна квадрату швидкості обтікання зернини. Розв’язок системи рівнянь (39) та (40) за початкових умов (41) знаходимо числовим методом із використанням комп’ютерного програмного середовища MathCAD.

Результати розв’язування рівнянь (39) та (40) представлені траєкторіями переміщення зернин, що різняться масою і, відповідно, коефіцієнтом k_V . Величина коефіцієнта k_V розраховувалася за співвідношенням:

$$k_V = 0,44 \frac{\rho_0}{\rho_3 d_e} \quad (42)$$

Результати моделювання процесу руху зернин представлені на **рис. 5** та **рис. 6**. За результатами теоретичного аналізу процесу руху частинок зернового матеріалу у вертикальному каналі за умов дії пульсацій повітряного потоку вперше отримано математичний опис, який пов’язує в єдину систему диференціальних рівнянь всі основні технологічні та конструкційні параметри пневматичного сепаратора із вертикальним каналом, дію пульсацій повітряного потоку та

вплив бічних сил на зернину, що дозволяє визначити раціональні межі поділу фракцій зернового матеріалу.

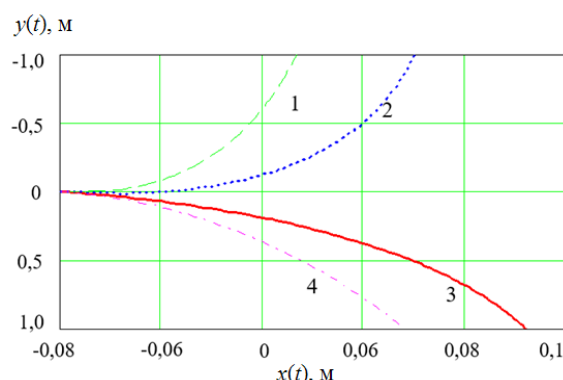


Рис. 5 – Траєкторії руху зернин у висхідному потоці повітря:

1 – $k_V = 0,4$; 2 – $k_V = 0,27$; 3 – $k_V = 0,16$;
4 – $k_V = 0,08$

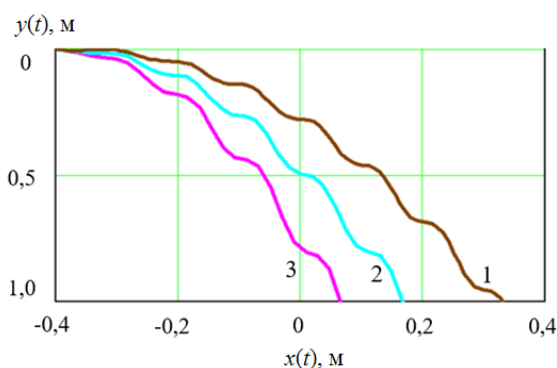


Рис. 6 – Траєкторії руху зернин у висхідному потоці повітря при дії горизонтальних пульсацій:

1 – $k_V = 0,18$; 2 – $k_V = 0,13$; 3 – $k_V = 0,06$

ВИСНОВКИ

Теоретично визначено закономірності руху зернини та вдосконалено математичну модель динаміки руху зернини у вертикальному потоці повітря, яка відрізняється від відомих тим, що враховує нерівномірність поля швидкості, дію бічних сил, концентрацію матеріалу. Застосування імпульсного потоку повітря дозволило збільшити відхилення одна від одної траєкторій руху зернин на 10–15%.

Розв’язок системи диференціальних рівнянь із початковими умовами виконано в комп’ютерному програмному середовищі MathCAD у вигляді траєкторій руху зернин у

вертикальному повітряному потоці, що дозволяє розраховувати їх траєкторії руху, які різняться коефіцієнтами парусності, та визначити параметри пневмогравітаційних сепараторів.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Bulgakov, V., Nikolaenko, S., Holovach, I., Boris, A., Kiurchev, S., Ichnatiev, Ye., & Olt, J. (2020). Theory of motion of grain mixture particle in the process of aspiration separation. *Agronomy Research*, 18(S2), 1177-1188. <https://doi.org/10.15159/AR.20.069>
- Nesterenko, O. V., Leshchenko, S. M., Vasylovskiy, O. M., & Petrenko, D. I. (2017). Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 53(3), 65-70.
- Piven, M., Volokh, V., Piven, A., & Kharchenko, S. (2018). Research into the process of loading the surface of a vibrosieve when a loose mixture is fed unevenly. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/1(96), 62-70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149739>
- Rogovskii, I. L., Stepanenko, S. P., Titova, L. L., Trokhaniak, V. I., Solomka, O. V., Popyk, P. S., & Shvidia, V. O. (2019a). Experimental studies on drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 57(1), 141-146.
- Rogovskii, I., Stepanenko, S., Titova, L., Trokhaniak, V., & Trokhaniak, O. (2019b). Experimental study in a pneumatic microbiocature separator with apparatus camera. In *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 12(61), 1 (pp. 117-128).
- Stepanenko, S. P., & Kotov, B. I. (2018a). Pneumonitis fractionation of grain materials in air streams of variable structure. *An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. ТЕКА*, 18(2), 69-74.
- Stepanenko, S. P., & Kotov, B. I. (2018b). Theoretical research of separation process grain mixtures. *An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. ТЕКА*, 18(3), 49-54.
- Stepanenko, S. P., & Kotov, B. I. (2019). Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*, 10(4), 137-143. <https://doi.org/10.31548/machenergy.2019.04.147-153>
- Vasylovskiy, O., Vasylovskaya, K., Moroz, S., Sviren, M., & Storozhyk, L. (2019). The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 57(1), 63-70.
- Абдуєв, М. М. (2007). *Обґрунтування параметрів сепаратора з нахиленим повітряним каналом для розділення зернових сумішей (Substantiation of parameters of the separator with the inclined air channel for separation of grain mixes)* [Автореф. дисертації канд. техн. наук]. ХНТУСГ імені П. Василенка, Харків.
- Богатирьов, Д. В. (2005). *Обґрунтування параметрів пневмоімпульсної машини для сепарації насіння за густиною (Substantiation of the parameters of the pneumatic pulse machine for seed separation by density)* [Дисертація канд. техн. наук]. Кіровоградський національний технічний університет, Кіровоград.
- Борщ, Ю. П. (2014). Моделирование динамики расслоенной зерновой смеси в вертикальном канале пневмосепарирующих устройств зерновых сепараторов (*Modeling of dynamics of stratified grain mixture in the vertical channel of pneumoseparating devices of grain separators*). *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, 152, 128-135.
- Бурков, А. И., & Сычугов, Н. П. (2000). *Зерноочистительные машины. Конструкция, исследование, расчет и испытание (Grain cleaning machines. Design, research, calculation and testing)*. Киров: Изд-во НИИСХ Северо-Восток.
- Гудков, А. Н. (1963). Теоретические положения определяющие режим работы потока воздуха пневматических устройств зерноочистительных машин (*Theoretical provisions defining the mode of robots of the air flow of pneumatic devices of grain cleaning machines*). *Труды Волгоградского СХИ*, 17, 135-146.
- Злочевський, В. Л. (1986). *Интенсификация процесса аэродинамического разделения зерновых материалов (Intensification of the process of aerodynamic separation of grain materials)* [Автореф. дисертації д-ра техн. наук]. СибИМЭ СО ВАСХНИЛ, Новосибирск.
- Зуев, Ф. Г. (1979). *Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях (Pneumatic transportation at grain processing plants)*. Москва: Колос.
- Колодій, О. С. (2015). *Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневмогравітаційного сепаратора насіння соняшника (Substantiation of design and technological parameters of pneumatic gravity separator of sunflower seeds)* [Автореф. дисертації канд. техн. наук]. Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Мелітополь.

- Котов, Б. І., & Степаненко, С. П. (2016). Дослідження впливу пульсуючого повітряного потоку на переміщення зерна у віброзрідженому шарі зерносомистого вороху (*Investigation of the influence of pulsating air flow on the movement of grain in the vibro-liquefied layer of grain straw heap*). *Механізація та електрифікація сільського господарства*, 4(103), 38-46.
- Котов, Б. І. та ін. (2017). *Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентильовання, охолодження) (Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and storage of grain (cleaning, separation, drying, active ventilation, cooling))*. Національна академія аграрних наук України, Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», Київ, Ніжин: Лисенко М. М. [вид.].
- Котов, Б. І., & Степаненко, С. П. (2020а). Основні теоретичні положення сепарації зернового матеріалу в повітряних каналах з нерівномірною швидкістю повітряного потоку (*The main theoretical provisions of the separation of grain material in air ducts with uneven air flow rate*). *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 50, 122-133.
- Котов, Б. І., & Степаненко, С. П. (2020b). Математичне моделювання процесів поділу компонентів зернового матеріалу в комбінованому вібраційно-повітряному сепараторі (*Mathematical modeling of processes of separation of components of grain material in the combined vibration-air separator*). *Вібрації в техніці та технологіях*, 2(97), 51-61.
- Кюрчев, С. В. (2019). *Механіко-технологічне обґрунтування післязбиральної обробки та зберігання насіння зернових і олійних культур (Mechanical and technological substantiation of post-harvest processing and storage of seeds of grain and oilseeds)* [Автореф. дисертації д-ра техн. наук]. ННЦ «ІМЕСГ», Глеваха.
- Ландау, Л. Д., & Лифшиц, Е. М. (1953). *Теорія сплошних сред (Continuum theory)*. Москва.
- Нелюбов, А. О., & Ветров, Е. Ф. (1977). *Пневмосепаруючі системи сільськогосподарських машин (Pneumatic separation systems of agricultural machines)*. Москва: Машиностроение.
- Нестеренко, О. В. (2017). *Обґрунтування параметрів пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зернового матеріалу (Substantiation of the parameters of the pneumatic separating channel with multilevel introduction of grain material)* [Автореф. дисертації канд. техн. наук]. Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький.
- Петренко, Н. Н., Марченко, І. В., & Марченко, К. Н. (2002). О возможности использования пульсирующего воздушного потока для воздушно-решетной очистки зернового вороха (*The possibility of using a pulsating air flow for air-screen cleaning of a grain heap*). *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 32, 117-121.
- Степаненко, С. П. (2021). *Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів (Mechanical and technological substantiation of processes and equipment of lattice fractionation of grain materials)* [Автореф. дисертації д-ра техн. наук]. ННЦ «ІМЕСГ», Глеваха.
- Степаненко, С. П., & Котов, Б. І. (2018а). Дослідження закономірностей руху компонентів зернового матеріалу під час пневмогравітаційного фракціонування у вертикальному каналі (*Investigation of regularities of movement of grain material components during pneumogravity fractionation in vertical channel*). *Механізація та електрифікація сільського господарства*, 7(106), 82-89.
- Степаненко, С. П., & Котов, Б. І. (2018b). Основні концептуальні положення пневматичного фракціонування зернових матеріалів (*Basic conceptual provisions of pneumatic fractionation of grain materials*). *Механізація та електрифікація сільського господарства*, 8(107), 80-88.
- Степаненко, С. П., Котов, Б. І., & Спірін, А. В. (2017). До питання математичного опису руху вимолоченого насіння в кільцевому каналі змінного перерізу (*Mathematical description of the movement of threshed seeds in the annular channel of variable cross section*). *Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія: Механізація сільськогосподарського виробництва*, 180, 330-339.