

7. Tetyanich, I.K., Orlova, L.V. Patent H02K5/16 (1995). Sredstva dlya krepleniya podshipnikov, naprimer izoliruyuschaya opora, sredstva dlya ustanovki podshipnika v schite (magnitnyie podshipniki H02K 7/09) [Patent H02K5 / 16. Means for mounting bearings, for example an insulating support, means for mounting a bearing in a shield (magnetic bearings H02K 7/09)] [in Russian].
8. Serdeshnov, A.P. (2008). *Remont elektrooborudovaniya v 2-h chastyah* [Repair of electrical equipment in 2 parts.]. Minsk. [in Russian].
9. Kopylov, I.P. (2011). *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow: Yurayt izd.4 [in Russian].
10. Materialyi NIPTIEM. (2015) [Materials NIPTIEM]. Vladimir [in Russian].

Tudor Erhan, Prof., DSc., **Nikolai Korneychuk**, PhD tech. sci., Prof.

State Agrarian University of Moldova, Chisinau, Moldova

Influence of Wear of Bearing Shields on ac Power Coefficient of Ac

The aim of the article is to ensure the reliability and durability of the bearing assemblies of electric motors used in electric drives. The solution to this problem is achieved through the timely elimination of defects in the seats under the rolling bearings in the motor shields.

The article presents the results of determining the dimensions, tolerances and roughness of the castle and landing surfaces of the bearing shields of electric motors to be restored by electrophysical methods. Plots of wear forms of bearing shields, bearing seats of bearings of rotors of electric motors are revealed and it is established that they depend on the operating mode of the electric motor. It was established that with increasing wear of the bearing shields of the rotors of electric motors from 0.15 to 0.24 mm, the ellipsoidal shape of the total magnetic flux becomes more pronounced. This leads to an increase in the angle of shift between the electrical components, which reduces the power factor of electric motors and efficiency. It has been established that the change in the air gap of asynchronous electric motors as a result of wear of the bearing shields leads to the same consequences.

As a result of studies, it was found that the most worn-out elements of electric motors are bearing shields, the wear of which depends on the material from which the bearing shields are made, the operating mode of the electric motor, the type of load on the shaft and the duration of operation. Based on the measurements of various types of bearing shields for electric motors of the 4AC series, the maximum wear sizes were determined, which can be restored by electrophysical methods. It has been established that the maximum wear of cast-iron bearing shields is 0.10-0.15 mm, and that of aluminum - 0.1-0.23 mm.

electrophysical recovery methods, wear of parts, electric motors, electric drives, electrical equipment, bearing shields, Power factor Cosφ

Одержано (Received) 29.11.2019

Прорецензовано (Reviewed) 09.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019

УДК 631.632.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.116-125>

Б.І. Котов, проф., д-р техн. наук

Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ), м. Кам'янець-Подільський, Україна

С.П. Степаненко, канд.техн.наук, ст. наук. співр.

Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», м.Київ, Україна

e-mail:stepanenko_s@ukr.net

Дослідження руху часток зернового матеріалу у вертикальному каналі пневмогравітаційного класифікатора

© Б.І. Котов, С.П. Степаненко, 2019

В статті розглядається підвищенні ефективності фракціонування зернових сумішей у пневматичних протоках кругового поперечного перерізу, шляхом визначення раціональної форми та параметрів подачі матеріалу, а також форми пневматичного каналу та варіантів розвантаження фракцій.

Отримано закономірності зміни швидкості руху та траєкторії матеріалу в пневматичних каналах круглого перетину з нижнім вивантаженням. Закономірності руху частинок у вигляді матеріальної точки вздовж поверхні живильної фази визначили з урахуванням сил опору повітря, сил тертя, вологості та щільності матеріалу на основі теоретичного вивчення процесу фракціонування суміші зерна в пневматичних каналах кругового поперечного перерізу.

Використовуючи запропоновані формули для проектування сепараторів повітря, можна визначити початкову швидкість і напрямок входження частинок у повітряний потік, що є початковими умовами для визначення траєкторії матеріалу в повітряних каналах круглого перетину з нижнім вивантаженням.

потік повітря, змінна швидкість повітря, траєкторія, стійкість сил, фракції, процес фракціонування, суміш зерна, повітряний сепаратор, пневматичний круговий потік

Б.И. Котов, проф., д-р техн. наук

Подольский государственный аграрно-технический университет (ПГАТУ), г. Каменец-Подольский, Украина

С.П. Степаненко, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.

Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства», г. Киев, Украина

Исследование движения частиц зернового материала в вертикальных каналах пневмогравитационного классификатора

В статье рассматривается повышение эффективности фракционирования зерновых смесей в пневматических протоках кругового поперечного сечения, путем определения рациональной формы и параметров подачи материала, а также формы пневматического канала и вариантов разгрузки фракций.

Получены закономерности изменения скорости движения и траектории материала в пневматических каналах круглого сечения с нижнейвыгрузкой. Закономерности движения частиц в виде материальной точки вдоль поверхности питательной фазы определили с учетом сил сопротивления воздуха, сил трения, влажности и плотности материала на основе теоретического изучения процесса фракционирования смеси зерна в пневматических каналах кругового поперечного сечения.

Используя предложенные формулы для проектирования сепараторов воздуха, можно определить начальную скорость и направление входения частиц в воздушный поток, которые являются исходными условиями для определения траектории материала в воздушных каналах круглого сечения с нижней выгрузкой.

поток воздуха, переменная скорость воздуха, траектория, устойчивость сил, фракции, процесс фракционирования, смесь зерна, воздушный сепаратор, пневматический круговой поток

Постановка проблеми. Відповідно до концепції фракційної технології післязбиральної обробки зерна, першу стадію поділу зернового матеріалу на фракції (фуражне, продовольче зерно, насіння) доцільно здійснювати в повітряних сепараторах. Існуючі (малочислені) схеми пневмогравітаційних сепараторів з нижньою зоною поділу, не забезпечують відповідної якості розділення зерна за аеродинамічними властивостями тому, що при розрахунках їх параметрів не враховуються всі елементи силової взаємодії зерна з повітряним потоком.

Тому продовження досліджень переміщення твердих частинок у пневмоканалах з метою вдосконалення конструкцій пневмосепаруючих систем є доволі актуальною задачею.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Показує, що проблема визначення закономірностей переміщення частинок зернового матеріалу в повітряних потоках пневмосепаруючих систем не є повністю вивченою. В окремих наукових працях аналізується окремий випадок впливу різних факторів (орієнтації частинки, її обертання, дії бокової сили, сил електризації та інших видів взаємодії частинки з повітряним потоком). У (ранніх) попередніх фундаментальних роботах [1-3] розглянуто теоретичні питання ідеалізованого процесу руху сферичної частинки в рівномірному

повітряному потоці. Вплив нерівномірності розподілу повітряного потоку в поперечному перетині каналу визначено в робот [4], а також в роботах [5,6, 13, 15] але не розкрито для поперечних сил Жуковського і Магнуса. В роботі [7, 11-14] на основі аналізу силової взаємодії при обтіканні частинки повітряним потоком виявлено визначено суттєву дію бокових сил, і подано методику їх розрахунку. Вплив обертання частинки на переміщення в нерухомому і рухомому повітрі проаналізовано в роботах [8-10, 14-20]. Аналізуючи проведені дослідження зроблено висновок, що для неврахованих бокових сил, на процес пневматичного фракціонування призводить до суттєвого відхилення траєкторій руху частинки і тим самим негативно впливає на процес поділу. Оскільки при дослідженнях процесів поділу компонентів в пневмографітаційних сепараторах для вказаних сил досі не враховувалась, постає питання визначення впливу поперечних сил і нерівномірності епюри швидкості повітря на процес зміни траєкторій і ефективності поділу компонентів зернового матеріалу.

Постановка завдання. Встановлення закономірностей руху частинок в повітряному потоці при нерівномірному розподілі швидкості потоку і дії виникаючих при цьому додаткових сил.

Виклад основного матеріалу. Розглядається переміщення частинки у формі кулі у вертикальному повітряному каналі при низхідному русі частинки в протитечійному режимі. При постановці завдання прийнято такі вихідні припущення(положення):

- 1) Аеродинамічний режим в каналі встановлений турбулентний. Швидкість повітряного потоку у поперечному перетині розподілена за логарифмічним законом;
- 2) Опір частинки визначається квадратичною залежністю відносної швидкості;
- 3) Частинка не взаємодіє з іншими частинками і стінками каналу;
- 4) Введення частки в канал за схемою(рис.1);
- 5) Частинка обертається з постійною швидкістю.

В якості методичних посилань при визначенні діючих систем складанні рівнянь руху частинки використані роботи [1,4,7,9,11, 12, 15-20].

Схема руху частинки і діючих на неї сил наведена на рис. 1.

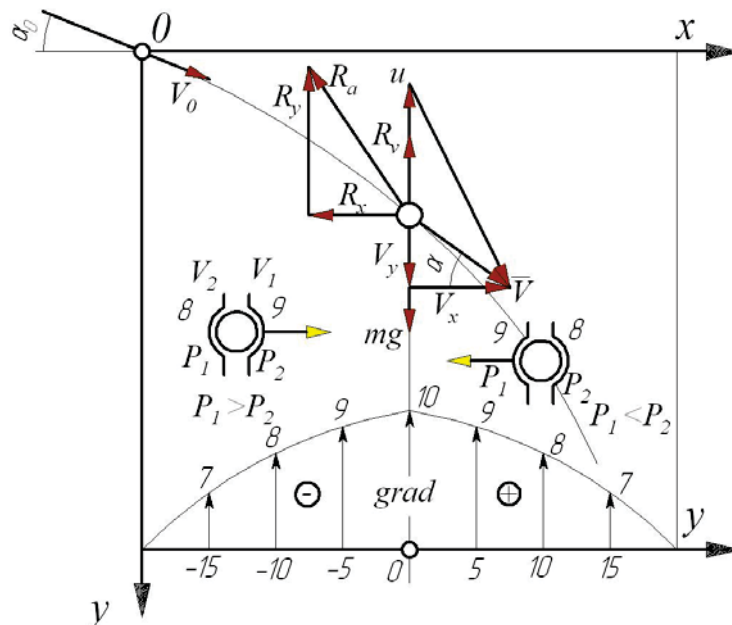


Рисунок 1 – Схема руху частинки і діючих на неї сил в пневмосепаруючому каналі
Джерело: розроблено авторами з використанням [1-9, 14-16]

На частинку, що переміщується в трубопроводі при висхідному русі повітря діють сили аеродинамічного опору, сили тяжіння (підйомна сила Архімеда враховується так як $\rho_{\text{п}} \gg \rho_{\text{п}}$), а також бокові сили спрямовані перпендикулярно до напрямку руху потоку повітря, які виникають при наявності градієнта швидкості потоку повітря, завдяки нерівномірності епюри розподілення швидкості повітря в поперечному перетині каналу і обертання частинки, яка омивається потоком з нерівномірним розподілом швидкості.

Для уточнення механізму взаємодії частинки з повітряним потоком при її переміщенні в повітряному каналі скористаємося моделлю силової взаємодії [7, 17-19] сферичної частини в площині, що проходить через вісь повітряного каналу.

Рівняння руху частинки при дії вищевказаних сил у векторній формі набувають вигляду:

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} = P_a + P_r + P_{\text{ж}} + P_{\text{м}} + P_o, \quad \bar{I} \frac{d\omega}{dt} = M; \quad \frac{dr}{dt} = \bar{V} \frac{d\alpha}{dt} = \omega,$$

де $m = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{ч}}$ – маса частинки;

$\bar{P} = C(\text{Re}) \rho_{\text{п}} \frac{V_{\text{в}}^2}{2} \cdot S_{\text{м}}$ – сила аеродинамічного опору;

$V_{\text{в}} = (V \pm V_{\text{п}})$ – відносна швидкість переміщення частинки (швидкість обтікання);

$S_{\text{м}} = \frac{\pi d^2}{4}$ – площа Міделєвого перетину;

$d = 2r$ – діаметр кульової частинки;

$\rho_{\text{п}}, \rho_{\text{ч}}$ – густина повітря і матеріалу частинки;

$C(\text{Re})$ – коефіцієнт аеродинамічного опору;

I – момент інерції частинки;

ω – швидкість обертання частинки;

r – радіус частинки еквівалентності циліндру;

α – кут обертання;

$P_{\text{ж}}$ – відхиляюча сила Жуковського;

$P_{\text{м}}$ – відхиляюча сила Магнуса;

P_o – сила опору при боковому переміщенні частинки.

Математичне формулювання дії «відхиляючих частинок» сил, відповідно до ефекту Магнуса і теореми Н. Е. Жуковського використовують в літературі за різними формулами [7-11], але для подальшого аналізу найбільш прийнятий запис у формі визначеній в [7, 13]. Виходячи з теореми М. Жуковського величина «змішучої сили» (підйомна) для плоско-паралельного потоку пропорційна відносній швидкості потоку, «омиває» частинку і величині циркуляції.

$$P_{1,2} = \rho \cdot V_{\text{ен}} \cdot \Gamma,$$

де Γ – циркуляція, швидкості по контуру, обтікаючу частинку разом з пограничним шаром.

Оскільки формула Жуковського може бути застосована тільки до нескінченного циліндра радіусом $r_{\text{ц}}$, то всі подальші вирази стосуються циліндричної форми, а для переходу до форми кулі, отримані формули помножити на перпендикулярний розмір частинки, що дорівнює $\frac{3}{4}r_{\text{ц}}$.

Величина циркуляції по коловому контуру [7] визначається формулою:

$$\Gamma_1 = \text{grad}(v_E)_y \pi_{\text{ц}}^2.$$

Швидкість повітряного потоку в пневмоканалі розподілена по перетину каналу і для турбулентного режиму ($\text{Re} > 2,3 \cdot 10^3 \dots 10^5$) може бути визначена за формулою [11, 13] А.Альтшуля:

$$\frac{g(x)}{g_{\max}} = 1 - 2 \frac{\lg\left(\frac{R}{x}\right)}{\frac{0.975}{\sqrt{\lambda}} + 1.35} = 1 - k(\lambda) \ln \frac{R}{x},$$

$$\text{де } k(\lambda) = \frac{2}{2.3} \left(\frac{0.975}{\sqrt{\lambda}} + 1.35 \right)^{-1}; \quad \lambda = 0.0032 + \frac{0.221}{\text{Re}^{0.237}}.$$

Тоді відповідно швидкість визначиться рівнянням:

$$S(x) = v_{\text{вн}} = \left[v_{\max} \left(1 - k\lambda \ln \frac{R}{x} \right) i - \bar{v}_n \right],$$

де i – одиничний вектор швидкості повітряного потоку (відносно вісі XOY)
 x – відстань від вісі каналу.

Значення $\text{grad}_x v_{\text{вн}}$ визначаються похідною від функції по x

$$\text{grad} v_{\text{вн},y} = \frac{dv_{\text{вн},y}}{dx} = v_{\max} k \frac{1}{x}.$$

Тоді циркуляція по коловому контуру визначиться виразом

$$\Gamma = v_{\max} k_1 \frac{1}{x} \pi_{\text{ц}}^2,$$

а величина сили Жуковського відповідно до [3] матиме вигляд:

$$P_{\text{ж}} = \rho \left[v_{\max} \left(1 - k \ln \frac{R}{x} \right) i - v_{\Gamma} \right] v_{\max} \frac{k}{x} \pi_{\text{ц}}^2.$$

Обертання частинки зернового матеріалу в (вертикальному) пневмоканалі може виникати в таких випадках:

при перпендикулярному «закручуванні» зернинки під час входу в канал;

при ударі кулеподібної частинки о жорстку перешкоду (стінка каналу) за рахунок зміщення центра мас частинки [7];

при наявності градієнта швидкості, при нерівномірному обтіканні частинки.

На рухомому з обертанням частинки діє сила, яка відхиляє частинку в бік нормально до вектора швидкості набігаючого потоку і спрямована в той бік частинки, напрямком якої обертання якої співпадає з напрямком потоку повітря (ефект Магнуса). Для визначення її значення будемо вважати відповідно до [7, 13, 15], що в точці, де знаходиться частинка (в даний момент часу), вона омивається повітряним потоком, що має швидкість:

$$v_{\text{вн}} = v_{\max} \left[1 - k \ln \frac{R}{x} \right] i - v_{\Pi},$$

однакову у всіх точках контура.

Величина циркуляції в цьому випадку визначається за формулою [7, 13]

$$\Gamma = 2\pi_{\text{ц}} v_{\text{вн}} = 2\pi_{\text{ц}}^2 \omega,$$

де ω – швидкість обертання частинки (еквівалентного циліндра радіусом $r_{\text{ц}}$).

Підставляючи значення циркуляції Γ в формулу отримаємо величину бокової (відхиляючої) сили Магнуса

$$P_M = 2\pi r_{\text{ц}}^2 \omega \rho \left[v_{\text{max}} \left(1 - k \ln \frac{R}{x} \right) i - v_{\Gamma} \right].$$

Враховуючи, що в двофазному протитечієвому потоці певної концентрації зменшується площа вільного перетину для руху повітря і відповідно збільшується швидкість обтікання частинки. Швидкість руху повітря у між зерновому просторі можна враховувати через порозність двофазного шару $-\varepsilon$ за очевидною формулою [6]:

$$v_{\Pi} = v_f / \varepsilon,$$

де v_f – швидкість повітря у каналі без матеріалу.

Тоді максимальну швидкість визначатимемо наступним чином :

$$v_{\text{max}1} = v_{\text{max}} / \varepsilon.$$

Записуючи рівняння(1) в проекціях на осі системи ОХУ з урахуванням [10] отримаємо диференціальні рівняння руху частинки у вертикальному каналі.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} &= -k_{\Pi} \frac{dx(t)}{dt} \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} + g(x) \right)^2} + \\ &+ (P_{Ж(x)} + P_{M(x)}) m^{-1} \frac{dx(t)}{\sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} + g(x) \right)^2}} \\ \frac{d^2 y(t)}{dt^2} &= g - k_{\Pi} \left(\frac{dy(t)}{dt} + g(x) \right) \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} + g(x) \right)^2} + \\ &+ (P_{Ж(x)} + P_{M(x)}) m^{-1} \frac{dx(t)}{\sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} + g(x) \right)^2}} \end{aligned}$$

де проекції сил:

$$P_{Ж(x)} = \frac{4}{3} 2\pi r_{\text{ц}}^3 \rho \frac{dx}{dt} g_{\text{max}}^* \frac{k}{x(t) + r_{\text{ц}}},$$

$$P_{M(x)} = \frac{8}{3} \pi r_{\text{ц}}^3 \rho \omega \frac{dx}{dt},$$

$$P_{Ж(y)} = \frac{4}{3} 2\pi r_{\text{ц}}^3 \rho \left[g_{\text{max}}^* \left(1 - k \cdot \ln \frac{R}{x(t) + r_{\text{ц}}} \right) + \frac{dy}{dt} \right] g_{\text{max}}^* \frac{k}{x(t) + r_{\text{ц}}},$$

$$P_{M(y)} = \frac{8}{3} \pi r_{\text{ц}}^3 \rho \omega \left[\frac{dy}{dt} + g_{\text{max}}^* \left(1 - k \cdot \ln \frac{R}{x(t) + r_{\text{ц}}} \right) \right],$$

$$g = g_{\text{max}}^* \left(1 - k \cdot \ln \frac{R}{x(t) + r_{\text{ц}}} \right),$$

де $r_{\text{ц}}$ – радіус еквівалентного циліндра;

R – відстань від вісі до стінки каналу;

$k = \frac{g}{g_{\text{віт}}^2}$ – коефіцієнт вітрильності;

$g_{\text{віт}}$ – швидкість витання.

Початкові умови:

$$x_{t=0} = -(x - r_{\text{ц}}); x(0) = 0; y(0) = 0; x(0) = \vartheta_0 \cos \theta_0; y(0) = \vartheta_0 \sin \theta_0;$$

ϑ_0, θ_0 – початкова швидкість і кут подачі матеріалу в канал;

Граничні умови:

$$-(x - r_{\text{ц}}) \leq x \leq (x - r_{\text{ц}}).$$

Обертання частинки відбувається із змінною в часі кутовою швидкістю $\omega(t)$. Її значення визначається з диференційного рівняння обертання кулі у в'язкому середовищі [9].

$$\frac{d\omega}{dt} = -15 \frac{\mu\omega}{\rho r_{\text{ц}}^2},$$

де $r_{\text{ц}}$ – радіус частинки;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості повітря.

Система нелінійних диференціальних рівнянь з граничними і початковими умовами вирішувалась чисельним методом в програмному середовищі MathCad.

Розв'язок системи рівнянь отримано у вигляді траєкторій руху часток, різного розміру (маси) та для різних значень швидкості обертання, які наведено на рис. 2-3.

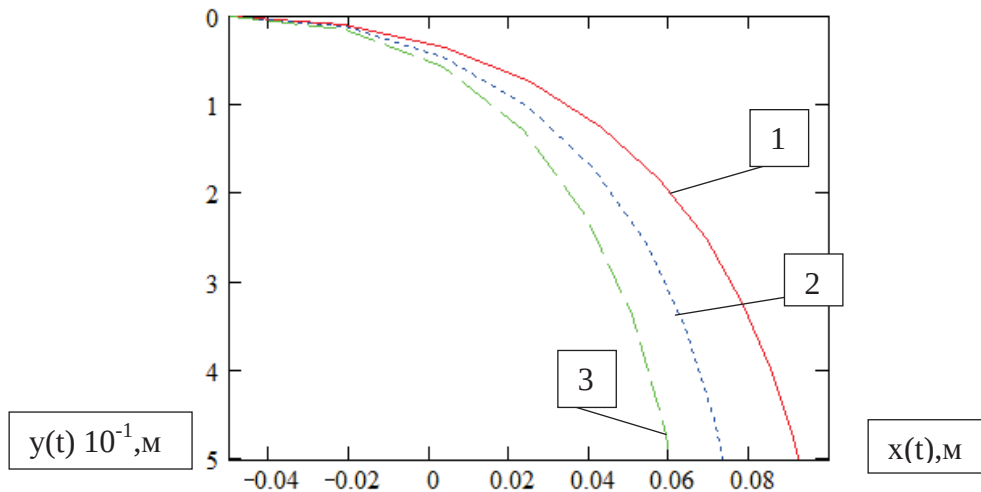


Рисунок 2 – Траєкторій руху часток в пневмосепаруючому каналі при різних значеннях швидкості обертання: 1 - $\omega = 100$; 2 - $\omega = 150$; 3 - $\omega = 200$;

Джерело: розроблено авторами

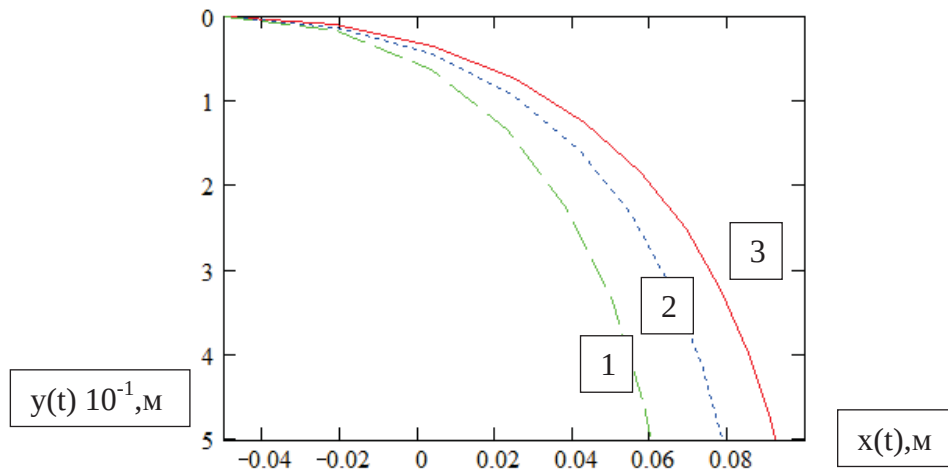


Рисунок 3 – Траєкторій руху часток в пневмосепаруючому каналі при різних значеннях коефіцієнта вітривності: 1 - $k_{\text{П}} = 0,174$; 2 - $k_{\text{П}} = 0,153$; 3 - $k_{\text{П}} = 0,121$

Джерело: розроблено авторами

Встановлено, що для кожного поточного моменту часу $t = t_1$ з координатами переміщення частинки $y_i(t_i)$ та $x_i(t_i)$ у відповідних напрямках можливо побудувати траєкторії переміщення в системі координат ХОУ.

Висновки. 1. На основі теоретичних досліджень з урахуванням відхиляючих сил Жуковського та Магнуса визначена можливість поділу частинок зернового матеріалу на фракції за аеродинамічними властивостями у вертикальних каналах із нижнім вивантаженням.

2. Використання повітряного потоку, як розділяючого носія, дозволяє значно збільшити величину розщеплення траєкторій і критерій поділу зерна на фракції.

3. Створені спрощені математичні моделі руху компонентів зернового матеріалу в повітряних сепараторах із вертикальними каналами, які дозволяють визначити раціональні режими роботи нових технічних засобів.

Список літератури

1. Гортинский В. В., Демский А. Б., Борискин М. А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. Москва: Колос, 1980. 304 с.
2. Малис А. Я., Демидов А. Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. Москва: Машгиз, 1962.
3. Нелюбов А. И. Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин / А. И. Нелюбов, Е. Ф. Ветров. Москва: Машиностроение, 1967. 190 с.
4. Матвеев А. С. Движение частицы зерновых материалов в пневмосепарирующем канале. *Доклады ВАСХНИЛ*. 1972. №5. С. 41-44.
5. Степаненко С. П., Котов Б. І. Дослідження закономірностей руху компонентів зернового матеріалу під час пневмогравітаційного фракціонування у вертикальному каналі. *Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодерж. зб.* 2018. Вип. №7 (106). С. 82-89.
6. Степаненко С. П., Котов Б. І., Спірін А. В. До питання математичного опису руху вимолоченого насіння в кільцевому каналі змінного перерізу. *Механізація сільськогосподарського виробництва: вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2017. 180. С. 330-339.
7. Зуев Ф. Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. Москва: Колос, 1976. 344 с.
8. Богомолов А. В. Учет вращения частицы зерновой смеси при движении ее в воздушном потоке. 2002. Вип. 9. С. 5-13.
9. Олышанський В. П., Олышанський С. В. О траектории полета вращающейся сферической частицы. *Вісник ХНТУСГ*. 2009. Вип. 88. С. 54-61.
10. Онищенко Б. П. Теоретичні дослідження процесу осідання краплі. *Сільськогосподарські машини*. 2009. Вип. 18. С. 330-340.
11. Барский М. Д. Фракционирование порошков. Москва. Недра, 1980. 327 с.
12. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. / Г. Шлихтинг пер. с немецкого. Москва: «Наука», 1974. 711 с.
13. Степаненко С. П., Котов Б. І., Спірін А. В. До питання математичного опису руху вимолоченого насіння в кільцевому каналі змінного перерізу. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2017. Вип. 180. С. 330-339.
14. Stepanenko S. P. Research pneumatic gravity separation grain materials. *Mechanization in Agriculture, conserving of the resources: International Scientific Journal of Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "Industry 4.0"*. Bulgarian, 2017. Vol. 63. Issue 2. S. 54-56.
15. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентильовання, охолодження): монографія / Б. І. Котов та ін. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М. М., 2017. 552 с.
16. Stepanenko S. Experimental study in a pneumatic microbioculture separator with apparatus camera / S. Stepanenko, Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. In: *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 2019. Vol. 12 (61), No. 1. pp. 117-128.
17. Stepanenko S. P. Experimental studies on drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment / Stepanenko S. P., Rogovskii I. L., Titova L. L., Trokhaniak V. I., Solomka

- O.V., Popyk P.S., Shvidia V.O. *INMATEH - Agricultura lEngineering* . Jan-Mar 2019, Vol. 57 Issue 1, pp. 141-146.
18. Research in to the process of loading the surface of a vibrosieve when a loose mixture is fed unevenly /Piven, M., Volokh, V., Piven, A., Kharchenko, S. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol 6, № 1 (96). P.62-70. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149739>
 19. The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality / O. Vasylovskiy, K. Vasylovskaya, S. Moroz, M. Sviren, L. Storozhyk. *INMATEH - Agricultural Engineering* – Romania, Bucharest: INMA. 2019. Vol. 57, No.1. 63-70.
 20. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding/ O.V. Nesterenko, S.M. Leshchenko, O.M. Vasylovskiy, D.I. Petrenko. *INMATEH - Agricultural Engineering* – Romania, Bucharest: INMA. 2017. Vol. 53, No.3. 65-70.

Referencis

1. Gortinsky, V.V., Demsky, A. B. & Boriskin, M. A. (1980). *Processy separirovaniya na zernopererabatyvayushhih predpriyatiyah* [Separation processes at grain processing enterprises]. Moscow: Kolos [in Russian].
2. Malis, A.Ya. & Demidov, A.R. (1962). *Mashiny dlja ochistki zerna vozdushnym potokom* [Machines for cleaning grain by air flow] . Mjskow: Mashgiz [in Russian].
3. Nelyubov, A.I. & Vetrov, E.F. (1967). *Pnevmostepariruyushhie sistemy sel'skhozajstvennyh mashin* [Pneumatic separation systems of agricultural machines] . Moscow: Mechanical Engineering [in Russian].
4. Matvov, A.S. (1972). Dvizhenie chasticy zernovyh materialov v pnevmostepariruyushhem kanale [The movement of a particle of grain materials in a pneumatic separation channel]. *Reports of VASKHNIL*, No. 5, 41-44 [in Russian].
5. Stepanenko, S.P. & Kotov, B.I. (2018). Doslidzhennia zakonmirnostej rukhu komponentiv zernovoho materialu pid chas pnevmohravitatsijnoho fraktsionuvannia u vertykal'nomu kanali [Subsequent laws of the components of the grain material at the hour of pneumatic gravity fraction at the vertical channel] . *Mekhanizatsiya and elektrifikatsiyasil'skogo statehood: zahal'no derzh. zb.*, Vol. No. 7 (106), 82-89 [in Ukrainian].
6. Stepanenko, S.P., Kotov, B.I. & Spirin, A.V. (2017). Do pytannia matematychnoho opysu rukhu vymolochenoho nasinnia v kil'tsevom kanali zminnoho pererizu [Before feeding the mathematical, I will describe the rukh of the milled nasinnia in the kiltsevky channel of the winter season] . *Mechanization of the State of the Law of Ukraine: News of the KhNTUSG*. P. Vasilenka , Vol. 180, 330-339 [in Ukrainian].
7. Zuev, F.G. (1976). *Pnevmaticheskoe transportirovanie na zernopererabatyvayushhih predpriyatiyah* [Pneumatic transportation at grain processing enterprises]. Moscow: Kolos [in Russian].
8. Bogomolov, A.V. (2002). Uchet vrashheniya chasticy zernovoj smesi pri dvizhenii ee v vozdushnom potoke [Accounting for the rotation of a particle of a grain mixture when it moves in the air stream] . *News of KhDTUSG*, Vol. 9, 5-13 [in Russian].
9. Ol'shans'kij V. P., Ol'shans'kij S.V. (2009). *O traektorii poleta vrashhajushhejsja sferichiskoj chasticy* [On the flight path of a rotating spherical particle]. *News of KhNTUSG*, Vol. 88, 54-61 [in Russian].
10. Onishchenko, B.P. (2009). Teoretychni doslidzhennia protsesu osidannia krapli T[heoretical progress to the process of creation]. *Sil'skogospodarski machine*, Vol.18, 330-340 [in Ukrainian].
11. Barsky, M.D. (1980). *Frakcionirovanie poroshkov* [Fractionation of powders]. Moscow: Nedra [in Russian].
12. Schlichting G. (Trans.) (1974). *Teoriya pogranychnoho sloja* [Theory of the boundary layer]. Mjskow: "Science" [in Russian].
13. Stepanenko, S.P., Kotov, B.I. & Spirin, A.V. (2017). Do pytannia matematychnoho opysu rukhu vymolochenoho nasinnia v kil'tsevom kanali zminnoho pererizu [Before feeding the math, I will describe a lot of ground grinding in the Kiltse channel of the winter break]. *Visnyk KhNTUSH*, Vol. 180, 330–339 [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, 54–56 [in English].
15. Kotov, B. I., Kalinichenko, R.A., Stepanenko, S.P., Shvidya, V.O. & Lisetsky, V.O. (2017). *Modeliuvannia tekhnologichnykh protsesiv v typovykh ob'iektakh pisliazybal'noi obrobky i zberihannia zerna (separatsiia, sushinnia, aktyvne ventyliuvannia, okholodzhennia)* [Modeling of technological

- processes in typical samples of selective sampling and grain harvesting (separation, drying, actively venting, cooling)]. Nizhin: Vidavets PP Lisenko M.M. [in Ukrainian].
16. Stepanenko, S., Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V. & Trokhaniak, O. (2019). Experimental study in a pneumatic microbioculture separator with apparatus camera. In: *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, vol. 12 (61), No. 1, pp. 117-128 [in English].
 17. Stepanenko, S.P. et al. (2019). Experimental studies on drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Jan-Mar 2019, Vol. 57 Issue 1, p141-146. 6p. [in English].
 18. Piven, M., Volokh, V., Piven, A. & Kharchenko, S. (2018). Research in to the process of loading the surface of a vibro sieve when a loose mixture is fed unevenly. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. - VOL 6, № 1 (96). P.62-70. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149739> [in English].
 19. 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 – Romania, Bucharest: INMA*. Vol. 57, No.1, 63-70. [in English].
 20. Nesterenko, O.V., Leshchenko, S.M., Vasylovskiy, O.M. & Petrenko, D.I. (2017). Analytical assessment of the pneumatics eparation quality in the process of grainmulti layer feeding. *INMATEH - Agricultural Engineering – Romania, Bucharest: INMA*. Vol. 53, No.3, 65-70. [in English].

Borys Kotov, Prof. DSci.

Podolsk State Agrarian and Technical University (PDATU), Kamyanets-Podilsky, Ukraine

Sergiy Stepanenko, PhD tech. sci., Senior Researcher

National Scientific Center "Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture", Kyiv, Ukraine

Investigation of the Movement of Particles of Grain Material in the Vertical Channels of the Pneumogravitational Classifier

The separation of grain mixtures into fractions by aerodynamic characteristics allows to increase the level of purity of the basic material - grains, seeds, etc., that is, to obtain a product with a given level of quality. The article discusses increasing the efficiency of fractionation of grain mixtures in pneumatic ducts of circular cross section by determining the rational shape and parameters of the material supply, as well as the shape of the pneumatic channel and options for unloading fractions.

Based on the use of aerodynamic provisions, an original mathematical model of the process of moving the particles introduced at an angle to the vertical pneumatic channel was created. The proposed model takes into account the logarithmic irregularity of the air velocity field plot. A number of assumptions have been made: air turbulent mode, the resistance of the particle is proportional to the square of its relative velocity, the particles do not interact with other particles and the walls of the channel, while rotating at a constant speed. Regularities of the change in the speed of movement and the trajectory of the material in pneumatic channels of circular cross section with lower discharge are obtained. The patterns of particle motion in the form of a material point along the surface of the nutrient phase were determined taking into account the air resistance forces, friction forces, humidity and density of the material based on a theoretical study of the fractionation of a grain mixture in pneumatic channels of circular cross section.

On the basis of theoretical studies, taking into account the deflection forces of Zhukovsky and Magnus, the possibility of separating particles of grain material into fractions by aerodynamic properties in vertical channels with lower discharge was determined. The use of airflow as a separating carrier can significantly increase the magnitude of the delineation of trajectories and the criterion of separation of grain into fractions. Simplified mathematical models of motion of components of grain material in air separators with vertical channels allow to determine the rational modes of operation of new technical means.

air flow, variable air speed, trajectory, stability of forces, fractions, fractionation process, grain mixture, air separator, pneumatic circular flow

Одержано (Received) 28.11.2019

Прорецензовано (Reviewed) 03.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019