

УДК 631.632.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.122-133>

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

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

e-mail: stepanenko_s@ukr.net

Б.І. Котов, проф., д-р техн. наук

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

Основні теоретичні положення сепарації зернового матеріалу в повітряних каналах з нерівномірною швидкістю повітряного потоку

В статті розглядається підвищення ефективності поділу зернових матеріалів у пневматичних вертикальних каналах, шляхом визначення раціональної форми та параметрів подачі матеріалу, а також геометричної форми пневматичного каналу та варіантів поділу на фракції.

Отримано закономірності зміни траєкторії та швидкості руху матеріалу в пневматичних вертикальних каналах круглого перетину з нижнім вивантаженням матеріалу. Закономірності руху частинок у вигляді матеріальної точки визначили з урахуванням сил опору повітря, сил тертя, сил Магнуса та Жуковського, вологості та густини матеріалу на основі теоретичного вивчення процесу фракціонування зернового матеріалу в пневматичних вертикальних каналах.

Використовуючи запропоновані залежності для проектування повітряних сепараторів, можна визначити початкову швидкість введення і напрямок входження зернівок у повітряний потік, що є початковими умовами для визначення траєкторії руху матеріалу в повітряних каналах з нижнім вивантаженням матеріалу.

потік повітря, зерновий матеріал, сили Магнуса та Жуковського, змінна швидкість повітря, траєкторія, процес фракціонування, повітряний сепаратор

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

Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства», пгт Глеваха, Украина

Б.И. Котов, проф., д-р техн. наук

Подольский государственный аграрно-технический университет, г. Каменец-Подольский, Украина

Основные теоретические положения сепарации зернового материала в воздушном канале с неравномерной скоростью воздушного потока

В статье рассматривается повышение эффективности разделения зерновых материалов в пневматических вертикальных каналах, путем определения рациональной формы и параметров подачи материала, а также геометрической формы пневматического канала и вариантов разделения на фракции.

Получены закономерности изменения траектории и скорости движения материала в пневматических вертикальных каналах круглого сечения с нижней выгрузкой материала. Закономерности движения частиц в виде материальной точки определили с учетом сил сопротивления воздуха, сил трения, сил Магнуса и Жуковского, влажности и плотности материала на основе теоретического изучения процесса фракционирования зернового материала в пневматических вертикальных каналах.

Используя предложенные зависимости для проектирования воздушных сепараторов, можно определить начальную скорость ввода и направление входения зерновок в воздушный поток, которые являются исходными условиями для определения траектории движения материала в воздушных каналах с нижней выгрузкой материала.

поток воздуха, зерновой материал, силы Магнуса и Жуковского, переменная скорость воздуха, траєкторія, процес фракціонування, воздушный сепаратор

© С.П. Степаненко, Б.І. Котов, 2020

Постановка проблеми. Повітряне або пневматичне сепарування (поділ) компонентів зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями (які досить тісно корелюються з біологічними особливостями зерна) використовують в багатьох типах сепаруючих і зерноочисних машин. Використовуються наступні способи розділення компонентів зернових матеріалів на фракції в повітряних потоках:

- пневмогравітаційна сепарація у вертикальних повітряних каналах;
- аеродинамічна сепарація в нахилених і горизонтальних повітряних каналах;
- пневмоінерційна сепарація в горизонтальних нахилених і вертикальних каналах з відцентровою подачею матеріалу.

Усі перераховані способи повітряної сепарації зернового матеріалу (ЗМ) оснований на різниці опору, що чинять окремі частинки ЗМ у повітряному потоці. Така протидія зумовлена фізико-механічними особливостями окремих частинок, які в нашому випадку характеризують їхні аеродинамічні властивості.

Основою розрахунків всіх способів повітряної сепарації є траєкторний аналіз, тобто побудова траєкторій переміщення частинок з різними аеродинамічними властивостями в каналах пневморозділяючих системи. Але розрахунки траєкторії виконуються, як правило, за спрощеною схемою враховуючи дію на частинки тільки двох сил-аеродинамічного опору та тяжіння, і при цьому, розглядається тільки рівномірний повітряні потоки. Такі спрощення не відтворюють реальний фізико-механічний процес силової взаємодії частинок з повітряним потоком, який в пневмоканалах має суттєво нерівномірну епіюру швидкості в поперечному перетині. Наявність нерівномірності поля швидкості повітря зумовлює виникнення додаткових поперечних сил, що діють на частинки. Оскільки критерієм ефективності поділу зернового матеріалу в каналах є величина розщеплення (відхилення) траєкторії компонентів ЗМ, то використання спрощених методів в їх розрахунку не дає можливості правильно визначити і оцінити ефективність конструкції пневмосепаратора та режиму його функціонування.

На сьогодні є достатньо даних, щодо впливу нерівномірності швидкості повітря в каналі і дії біякових сил на траєкторії руху компонентів зернового матеріалу (КЗМ). Запропоновані схеми пневмосепараторів із штучною (керованою) зміною швидкості повітря за координатою та в часі. Для виявлення і оцінки способів підвищення ефективності поділу КЗМ за аеродинамічними властивостями необхідно мати більш точний математичний опис процесу руху частинок в нерівномірних повітряних потоках.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Основи математичного опису процесу переміщення частинки (як матеріальної точки) в середовищі (повітряному) з опором закладено в роботах Васеленка П.М. [1-2], Заїки П.М. [3], в нахиленому потоці, Гортинського В.В із співавторами [4], у вертикальному потоці. Процеси повітряної сепарації висвітлені у фундаментальних роботах [5-6]. Деталізоване визначення величини бокових сил типу Магнуса і Жуковського і оцінено їх вплив на рух частинки в пневмоканалі в роботі Зуєва Ф.Г. [7-8].

В роботі [9], розглянута математична модель руху частинки у вертикальному каналі з нерівномірним по перченому перетині потоком повітря. В роботі [10], визначено негативний вплив нерівномірності потоку повітря на розходження траєкторій руху КЗМ. В роботі Абдуєва М.М. [11], розглянуто дію штучно сформовано епіри швидкості повітря (зміна швидкості повітря за висотою поперечного перетину нахиленого каналу. В роботі [12], реалізовано зміну швидкості за висотою каналу в напрямку руху потоку повітря. В роботах [13], сформульовано математичні моделі переміщення частинок КЗМ в канал при зміні швидкості повітря за координатами. Але у всіх останніх публікаціях розглянуто процес переміщення частинок в рівномірному за

площею поперечного перетину каналів потоці повітря і відповідно дія бокових сил не враховується. В роботі [14], дію сил Магнуса і Жуковського враховано при визначенні осідання краплі в поперечному потоці без врахування кута вводу краплі.

Постановка завдання. Формулювання математичного опису процесу переміщення частинки в повітряних каналах за наявності нерівномірної епюри швидкості повітря і дії бокових не керованих сил, частинки зернового матеріалу.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо плоский повітряний канал з паралельними стінками розміщений до горизонту, як найбільш використовуємий варіант виконання пневмосепаратора (пневмогравітаційного типу) який найбільш досліджений експериментально на різних видах насінневого матеріалу [4, 5, 6, 10, 12, 23]. Схема сил і швидкостей, діючих на частину наведена на рис. 1. При складанні математичного опису переміщення частинки (представленою матеріальною точкою з масою m та еквівалентним діаметром d) за схемою [1, 2, 4, 8, 11, 14, 16, 21, 22, 24], прийнято наступні припущення: ідеалізуючи реальний процес частинка не взаємодіє з іншими частинками і стінками каналу; рух повітряного потоку встановлений (стаціонарний); швидкість повітря розподілена в поперечному каналі і в напрямку руху не змінюється; аеродинамічні властивості частинки визначають коефіцієнтом вітрильності $k_B = g/v_{\text{виг}}^2$, (де $v_{\text{виг}}$ – швидкість витання визначена експериментально); дія частинок на повітряний потік не враховується; на частинку в процесі її взаємодії із нерівномірним потоком повітря ряд сил Архімеда, приєднаної маси, електростатичні та інші обмежень на які в наслідок їх мінімальних значень не враховуються); параметри вводу частинки в потік визначаються граничними умовами.

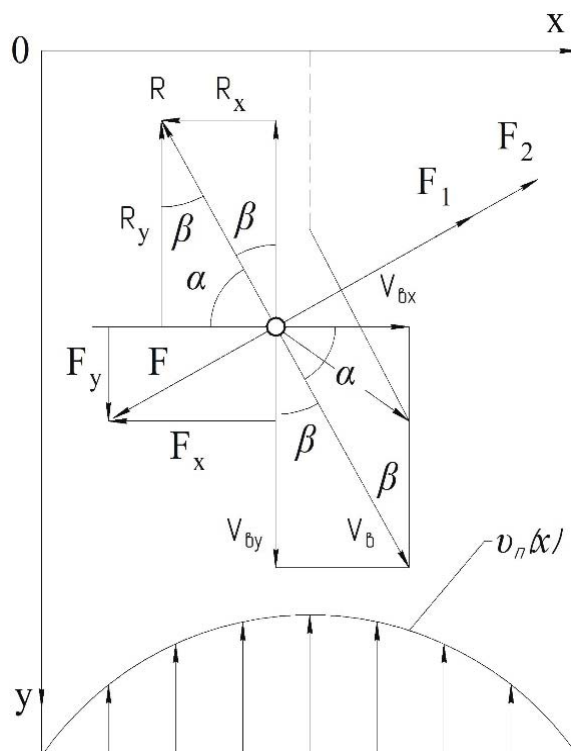


Рисунок 1 – Схема діючих сил і швидкостей на зернівку в процесі її руху в вертикальному пневмосепаруючому каналі

Джерело: розроблено авторами з використанням [13, 18-21]

Розподіл швидкості повітряного потоку за висотою каналу B прийнято в степеневому законі [8, 15]:

$$V_n(y) = V_{n(\max)} \left(\frac{x}{B} \right)^n,$$

де n – коефіцієнт що залежить від режиму обтікання частинки.

Рух частинки відбувається на площині в декартовій прямокутній системі координат XOY у вертикальному каналі.

Прийнято, що в повітряному потоці на кожну частинку діють такі сили: сила тяжіння G , сила аеродинамічного опору R , а також бокові сили F_1 (типу Жуковського) та $F_2(\omega)$ – сила, що утворюється при обертанні частинки з частотою ω , (сила Магнуса) [7-8].

Тоді рівняння руху частинки в нерівномірному повітряному потоці можна записати у вертикальній формі:

$$m \frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{G} + \bar{R} + \bar{F}_1 + \bar{F}_2(\omega),$$

де ω – кутова швидкість обертання частинки навколо її вісі.

На даний час немає точної теорії, дозволяючої визначити реальну силу аеродинамічного опору \bar{R} . Тому використана спрощена напівемпірична залежність [16]:

$$\bar{R} = m \cdot k_B (\bar{V}_n - V) |\bar{V}_n - V| = k_B m U^2,$$

в якій вектор сили опору спрямований в бік протилежний вектору відносної швидкості, а модуль пропорційний квадрату відносної швидкості:

$$\bar{U} = \bar{V}_n(y) - \bar{V},$$

де \bar{V} – абсолютна швидкість частинки;

U – модуль швидкості частинки відносно системи координат x, y , що рухається разом з повітрям з переносною швидкістю $-V_n$.

Величина бокових сил $F_{1,2}$, для плоско-паралельного потоку, відповідно до теореми Жуковського М.Е. [7-8], є пропорційна відносній швидкості, набігаю чого на частинку потоку \bar{U} і циркуляції Γ :

$$\bar{F}_{1,2} = \rho \cdot \bar{U} \cdot \Gamma,$$

Відносна швидкість з урахуванням (1)

$$\bar{U}(x) = V_{n \max} \left(\frac{x}{B} \right)^n \bar{i} - \bar{V},$$

де \bar{i} – одиничний вектор вісі oy .

Циркуляція швидкісного поля для бокової сили типу М. Жуковського відносно до [8], визначається з виразу:

$$\Gamma_1 = \pi r_n^2 \text{grad}_y U_y = \pi \cdot r_n^2 \frac{dU(X)}{dy},$$

Градiєнт відносної швидкості повітря C , визначається з виразу:

$$C = \frac{dU(X)}{dy} = U_{n \max} \frac{n}{B^n} x^{n-1},$$

а силу F_1 можна записати у вигляді:

$$\bar{F}_1 = \frac{V_{\max} n x^{n-1}}{B^n} \left[V_{n \max} \left(\frac{x}{B} \right)^n \bar{v} - \bar{V} \right] \pi r_{\text{ц}}^2 \cdot \rho,$$

де $r_{\text{ц}}$ – радіус циліндра еквівалентного кулі з радіусом r ; $r_{\text{ц}} = \frac{4}{3} r^3 = \frac{4}{3} \left(\frac{d}{2} \right)^3$.

При обертанні циліндра еквівалентного кулі, величина циркуляції визначається за формулою [8]:

$$\Gamma_2 = 2\pi r_{\text{ц}} U(X) = 2\pi r_{\text{ц}}^2 \omega = \frac{4}{3} \pi r^3 \omega,$$

де ω – кутова швидкість обертання частинки.

Бокова сила F_2 (за ефектом Магнуса) визначається виразом:

$$\bar{F}_2 = \frac{8}{3} \pi \rho \left(\frac{d}{2} \right)^3 \omega \left[V_{n \max} \left(\frac{x}{B} \right)^n \bar{v} - \bar{V} \right],$$

Швидкість обертання частинки в повітряному потоці під час переміщення змінюється, а їх значення можна наближено визначити рівнянням [1, 6-8, 14, 16, 19, 21].

$$\omega(t) = \omega_0 \exp \left[-\frac{18\mu}{\rho_r r^2} t \right],$$

де μ – динамічна в'язкість повітря;

ρ_r – густина частинки;

r – радіус;

ω_0 – початкове значення кутової швидкості.

Напрями вектора сили аеродинамічного опору вважається спрямованим у протилежний бік від відносної швидкості і тому проекції вектора \bar{R} дорівнюють:

$$R_x = -R \sin \beta, \quad R_y = -R \cos \beta,$$

$$\text{де } \sin \beta = \frac{x}{U}; \quad \cos \beta = \frac{V_n(x)+y}{U}; \quad U = \sqrt{\dot{x}^2 + (V_n(x) + y)^2}$$

Оскільки напрям векторів бокових сил, F_1 , та F_2 , вважається спрямованими перпендикулярно [Зуєв] напрямку відносної швидкості у бік сторони частинки де швидкість обтікання більша, то проекція бокових сил дорівнює:

$$F_{(1,2)x} = \pm F_{(1,2)} \cos \beta, \quad F_{(1,2)y} = \pm F_{(1,2)} \sin \beta,$$

Вектор \bar{U} є дотичним до траєкторії руху частинки в системі координат XOY .

При розрахунку траєкторії частинки треба визначити залежності $x(t)$ і $y(t)$. Для знаходження функцій $x(t)$ і $y(t)$ спроектуємо рівняння руху частинки на вісі системи координат XOY .

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -R \sin \beta \pm F_1^x \cos \beta \pm F_2^x \cos \beta, \\ m\ddot{y} &= mg - R \cos \beta \pm F_1^y \sin \beta \pm F_2^y \sin \beta. \end{aligned}$$

Подвійні знаки перед силами F_1 означають зміну напрямку вектора дії сили при пересіченні часткою вісі симетрії в точці $x=0$ де ($V_n = V_{n \max}$). Задаються граничними умовами. Напрямок вектора сили F_2 залежить від напрямку обертання частинки навколо її вісі (випадку колеподібної форми частинки).

Проекції сил $F_{1,2}^{x,y}$ (по модулю) дорівнюють:

$$F_1^y = \frac{V_{\max} n x^{n-1}}{B^n} \left[V_{n \max} \left(\frac{x}{B} \right)^n - V_y \right] \frac{\pi}{2} r^3 \rho,$$

$$F_1^x = \frac{V_{\max} n x^{n-1}}{B^n} V_x \frac{\pi}{2} r^3 \rho,$$

$$F_2^x = \frac{8}{3} \pi \rho r^3 V_y \omega(t), \quad V_y = \frac{dy}{dt} = \dot{y},$$

$$F_2^y = \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \left[V_{n \max} \left(\frac{x}{B} \right)^n - V_y \right] \omega(t), \quad V_x = \frac{dx}{dt} = \dot{x},$$

Функція $\omega(t)$ визначається розв'язком диференціального рівняння:

$$I \frac{d\omega(t)}{dt} = \bar{M},$$

де M – момент, що діє на частинку величина якого визначається силою аеродинамічного опору і плечем щодо центра мас частинки;

I – момент інерції.

Не вдаючись до подробиць методики визначення величини плеча сили відносно центра мас частинки (наведеної в роботі [8] для прийнятого розподілу швидкості повітря в каналі $V(y)$, залежності (1) для значення $n = \frac{1}{7}$ в роботі [8] отримано лінійний закон зміни величини плеча $a(x)$:

$$a(\lambda)a = 0,125 \frac{r}{B-r} (B-x),$$

де x – координата центра мас частинки.

Величина моменту $\bar{M} = \bar{R}a(x)$ рівняння (21) при цьому набуває вигляду:

$$I \frac{d\omega}{dt} = 0,152 \cdot k_B \cdot m \cdot \left(V_{\max} \left(\frac{x}{B} \right)^{\frac{1}{7}} - V_y \right)^2 \cdot \frac{B-x}{B-r},$$

З огляду на вищезгадане і враховуючи, що $m = \frac{4}{3} r^3 \rho_r$, ρ_r – густина речовини частинки диференціальні рівняння руху круглої частинки в проекціях на вісі координат XOY можна представити у такому вигляді:

$$\ddot{x} = -k_n \dot{x} \sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} + V_n(x))^2} + \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} + V_n(x))^2}} \left[2 \frac{\rho}{\rho_r} r^3 \omega(t) \cdot \dot{x} \pm \frac{\rho}{\rho_r} r^3 n \frac{V_{\max} x^{n-1}}{B^n} \frac{x}{\dot{x}} \right],$$

$$\ddot{y} = g - k_n (\dot{y} + V_n(x)) \sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} + V_n(x))^2} + \frac{\dot{y} + V_n(x)}{\sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} + V_n(x))^2}} \left[2 \frac{\rho}{\rho_r} r^3 \omega(t) \cdot V_{\max} \left(\frac{x}{B} \right)^n - \dot{y} \right] \pm \frac{\rho}{\rho_r} r^3 n \frac{V_{\max} x^{n-1}}{B^n} \left[V_{\max} \left(\frac{x}{B} \right)^n - \dot{y} \right],$$

Система нелінійних диференціальних рівнянь визначає рух круглої частинки радіусом r з густиною ρ_r в системі координат XOY у вертикальному повітряному потоці, обмеженому координатами $0,5r \leq x \leq B$. При входженні частинки в другу

половину потоку сила F_1 змінює напрямлення. Сила опору R в будь якій точці потоку буде спрямована протилежно вектору відносної швидкості. При координаті центра мас частинка $x > B$ напрямком складових F_{1x} і F_{1y} бокових сил змінюється тому в наведених вище рівняннях перед виразами цих сил знак змінюється на протилежний. Проекція сили F_{2x} змінює знак при зміні напрямку кутової швидкості.

Направлення моменту M при значенні $x > B$ змінюється на протилежне.

Крім всього відміченого треба враховувати, що залежність $V_n(x)$ зміни швидкості повітря в поперечному перетині каналу справедлива тільки до значення $x=B$. Тому при числовому розв'язку координат на вісі x визначають з негативного значення $(-B \ 0 \ +B)$, де B – величина половини каналу на яку його перетин розділяє вісь симетрії і місце завантаження з негативного боку каналу.

Початкові і граничні умови для розв'язку системи рівнянь можуть бути записані у вигляді: при $t = 0, y = 0, x = -B, \omega = \pm\omega_0, \dot{x}(0) = V_0 \cos \lambda_0$;

$$\dot{y}(0) = V_0 \sin \lambda_0; \quad \bar{x}(0) = -(x + r) .$$

граничні умови: $x < 0; F_1 > 0; F_2 > 0$;

$x > 0; F_1 < 0; F_2 < 0$;

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

Дійсна швидкість повітряного потоку при наявності в каналі зернового матеріалу визначається за очевидною формулою:

$$V_n |x| = \frac{V_n \cdot f}{\varepsilon}; \quad V_{n \max} = \frac{V_{\max}}{\varepsilon}$$

$$\text{де } \varepsilon = \frac{1}{1 + \mu};$$

$$\mu - \text{ масова концентрація матеріалу. } \mu = \frac{G_3}{G_{II}};$$

G_{II}, G_3 – витрати повітря і зерна кг/с.

Розв'язок системи рівнянь з визначеними початковими і граничними умовами виконано в програмному середовищі MathCad у вигляді траєкторії руху частинок з різними значеннями k_n і наведено на (рис. 2).

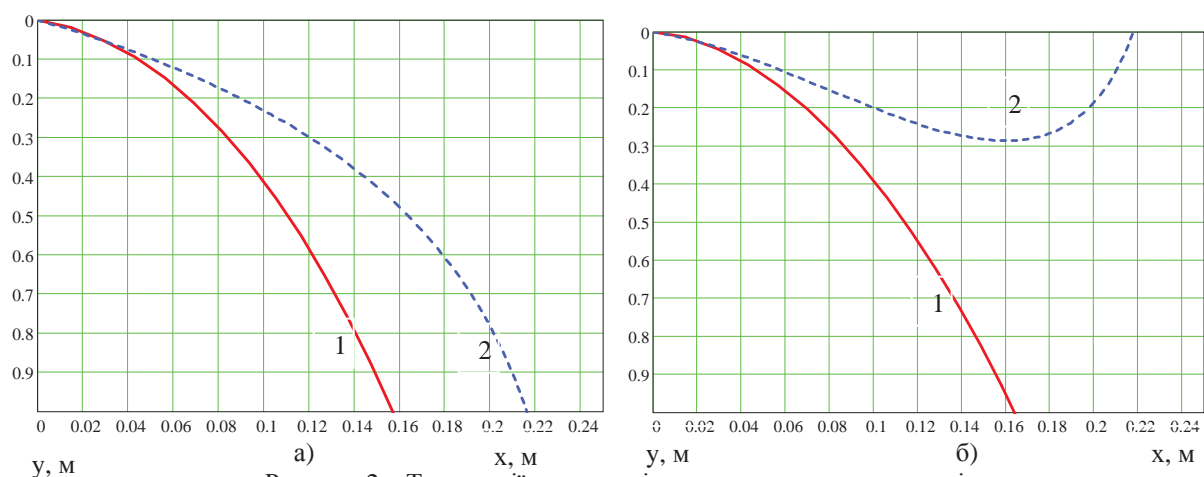


Рисунок 2 – Траєкторії руху зернівок у вертикальному каналі:

а) при рівномірній швидкості потоку; б) при розподіленій швидкості потоку повітря;

$$1 - k_n = 0,081; \quad 2 - k_n = 0,153.$$

Джерело: розроблено авторами

Розглянемо плоский повітряний канал розміщений горизонтально (рис. 3). Подача матеріалу в канал реалізується в напрямку руху потоку під кутом α_0 і швидкістю V_0 . Швидкість потоку повітря в поперечному перетині каналу розподілена за ступеневим законом $V_n(y) = V_{\max} \left(\frac{y}{B} \right)^n$; (де $B=0,5H$ – половина висоти каналу) по висоті каналу H .

Рух частинки відбувається на площині в прямокутних координатах x, y .

Проекція діючих сил: G, R, F_1, F_2 на вісі координат визначаються наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} R_x &= R \cos \lambda; \quad \cos \lambda = \frac{\dot{x}}{U}; \quad \sin \lambda = \frac{\dot{y}}{U}; \\ R_y &= -R \sin \lambda; \quad \sin U = \sqrt{(V_n(y) - \dot{x})^2 + \dot{y}^2}; \\ F_{1,2}^x &= F_{1,2} \sin \lambda; \quad F_{1,2}^y = F_{1,2} \cos \lambda \end{aligned}$$

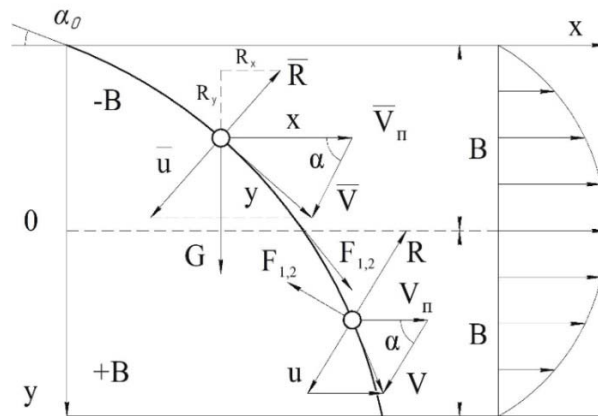


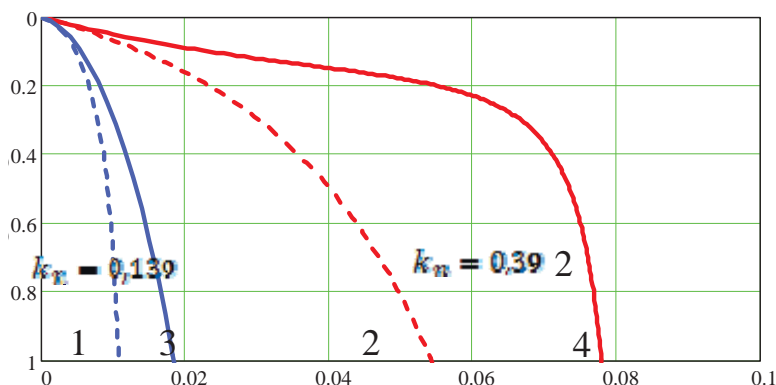
Рисунок 3 – Схема швидкостей і сил, що діють на зернівку в горизонтальному повітряному каналі
Джерело: розроблено авторами

З урахуванням отриманих співвідношень проектуючи рівняння на осі X, Y отримаємо систему диференціальних рівнянь, які описують динаміку переміщення частинки в супутньому повітряному потоці горизонтального каналу:

$$\begin{cases} \ddot{x} = k_n(V_n(y) - \dot{x})\sqrt{(V_n(y) - \dot{x})^2 + \dot{y}^2} + \frac{\dot{y}}{\sqrt{(V_n(y) - \dot{x})^2 + \dot{y}^2}} \cdot \\ \quad \left[2 \frac{\rho}{\rho_r} r^3 \omega(t) \dot{x} \pm \frac{\rho}{\rho_r} r^3 n \frac{V_{\max} y^{n-1}}{B^n} \dot{x} \right], \\ \ddot{y} = g - k_n \dot{y} \sqrt{(V_n(y) - \dot{x})^2 + \dot{y}^2} \pm \frac{(V_n(y) - \dot{x})}{\sqrt{(V_n(y) - \dot{x})^2 + \dot{y}^2}} \cdot \\ \quad \left[2 \frac{\rho}{\rho_r} r^3 \omega(t) \left(V_{\max} \left(\frac{y}{B} \right)^n - \dot{y} \right) \pm \frac{\rho}{\rho_r} r^3 n \frac{V_{\max} \left(\frac{y}{B} \right)^n}{B^n} - \dot{y} \right], \\ I \frac{d\omega}{dt} = 0,0625 \cdot k_n \cdot m \cdot \left(V_{\max} \left(\frac{y}{B} \right)^{\frac{1}{7}} - V_x \right)^2 \cdot \frac{B-x}{B-r}. \end{cases}$$

Початкові та граничні умови $t = 0; y = -B; x = 0; \dot{x} = V_0 \cos \lambda_0; \dot{y} = V_0 \sin \lambda_0; y < 0; F_1, F_2 > 0; y > 0; F_{1,2} < 0; -(y+r) \leq y \leq (y+r)$.

Розв'язок рівняння отримано чисельно в комп'ютерному середовищі MathCad – 10 у вигляді траєкторій руху частинки при рівномірному і нерівномірному потоці, які представлено на (рис. 4).



1, 2 – рівномірний потік повітря; 3, 4 – нерівномірний потік повітря
Рисунок 4 – Траєкторії руху частинок в горизонтальному каналі за рівномірного та нерівномірного потоку повітря

Джерело: розроблено авторами

При моделюванні руху частинок в нахиленому плоскому повітряному каналі, верхні та нижні стінки якого нахилені до горизонту під кутом γ , а відстань між ними дорівнює $H = 2B$, схема якого наведена на (рис. 5).

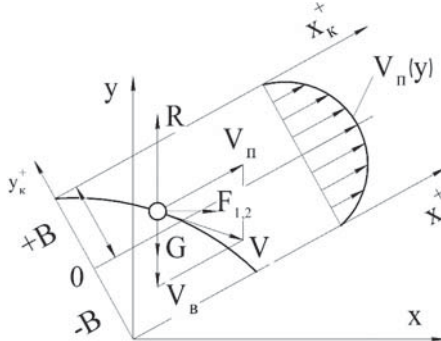


Рисунок 5 – Схема швидкостей і сил, що діють на зернівку в нахиленому повітряному каналі

Джерело: розроблено авторами

За умов швидкості висхідного повітряного потоку розподіленого нерівномірно за висотою каналу відносно осі симетрії за ступеневим законом $V_n(y) = V_{\max} \left(\frac{y}{B} \right)^n$, можна використовувати систему диференціальних рівнянь, яка описує рух частинки в повітряному каналі (квазігоризонтальному) відповідно до [17]. При цьому до першого рівняння системи додається складова $-g \sin \gamma$, а в другому рівнянні величина прискорення вільного падіння множиться на $\cos \gamma$, (тобто $-g \cos \gamma$).

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

Висновки. 1. Отримані математичні моделі описують основні особливості руху частинок, які різняться коефіцієнтом вітривності, розміром і густиною у вертикальних, горизонтальних і нахилених пневмоканалах зерно сепараторів.

2. Математичні моделі переміщення компонентів зернового матеріалу дозволяють розраховувати траєкторії руху і кількісно оцінити вплив нерівномірності

швидкості потоку і її структури на розходження траєкторій і, відповідно ефективність сепарації за аеродинамічними характеристиками.

3. Визначивши вплив структури повітряного потоку на відхилення траєкторії руху частинок можна оцінити процес сепарації можливість керування процесом поділу зміною епюри швидкості повітря.

Список літератури

1. Василенко П.М. Об уравнениях транспортировки частиц в сопротивляющихся средах. *Доклади ВАСХНИЛ*. 1970. №4, С. 44 – 46.
2. Василенко П.М. Введение в земледельческую механику. Киев «Сільгоспосвіта», 1996. 251 с.
3. Заика П.М. Теория сельскохозяйственных машин Т.4. Харків, 2002.
4. Гортинский В.В. Процеси сепарування на зерноперерабатывающих предприятиях. / В.В Гортинский, А.М. Демский, М.А. Борискин. М. Колос 1980. 296 с.
5. Малис А.Я., Демидов А.Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. М. Машгиз, 1962. 452 с.
6. Нелюбов А.И., Ветров Е.Ф. Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин. М.: Машиностроение, 1967. 190 с.
7. Прандль Л. Гидроаэромеханика. М. Иностран. лит., 1951. 575 с.
8. Зуев Ф.Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. М. Колос, 1976. 344 с.
9. Матвеев А.С. Исследование процесса сепарирования зерновых смесей вертикально-восходящим воздушным потоком: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. М. ВИМ. 1973. 30 с.
10. Злочевский В.Л. Интенсификация процесса аэродинамического разделения зерновых материалов: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. техн. наук. Новосибирск. Сиб. ИМЭСХ 1986. 35 с.
11. Абдуев М.М., Манчинский Ю.О. Теоретичне визначення доцільної області параметрів повітряного ворохоочисника. *Наукові праці Національного аграрного ун-ту*. 2000. Т 7. С. 127 – 132.
12. Колодій О.С. Обгрунтування конструктивно – технологічних параметрів пневмогравітаційного сепаратора насіння соящика: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.11. Мелітополь, ТДТАУ, 2015. 26 с.
13. 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.
14. Онищенко Б.В. Теоретичні дослідження процесу осідання краплі. *Сільськогосподарські машини*. 2009. Вип. 18. С. 330 – 340.
15. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа, М.-Л.: Гос. изд. Техничко-теор лит., 1950. 676 с.
16. Бабуха Г.Л., Шрайбер А.А. Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках, К. «Наукова думка» 1972. 173 с.
17. Бакум М.В., Ольшанський В.П., Кречот М.М. Теоретичний аналіз руху частинок в плоскому нахиленому пневмоканалі сепараторів. *Вісник ХНТУСГ*. 2009. Вип. 88. С.19 – 26.
18. 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. S.– 54–56.
19. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження): монографія / Б. І. Котов та ін. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М. М., 2017. 552 с.
20. Stepanenko S. Experimental study in a pneumatic microbiocature 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*, vol. 12 (61), No. 1 – 2019. pp. 117-128.
21. 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 - Agricultural Engineering* . Jan-Mar 2019, Vol. 57 Issue 1, p141-146. 6p.
22. Research into 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>
23. The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality / O.Vasylykovskiy, K. Vasylykovska, S. Moroz, M. Sviren, L. Storozhyk // *INMATEH - Agricultural Engineering – Romania, Bucharest: INMA*. Vol. 57, No.1. 2019, 63-70.

24. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding / O.V. Nesterenko, S.M. Leshchenko, O.M. Vasytkovskyi, D.I. Petrenko // INMATEH - Agricultural Engineering – Romania, Bucharest: INMA. Vol. 53, No.3. 2017, 65-70.

Referencis

1. Vasilenko, P.M. (1970). On the equations of particle transport in resisting media. *Doklady VASKhNIL, №4*, 44 - 46. [in Russian].
2. Vasilenko, P.M. (1996). Introduction to Agricultural Mechanics. Kiev "Silgosposvita" [in Russian].
3. Stutterer, P.M. (2002). Theory of agricultural machines V.4. Kharkiv [in Russian].
4. Gortinsky, V.V., Demsky, A.M. & Boriskin, M.A. (1980). Separation processes at grain processing plants. Moskow. Kolos [in Russian].
5. Malis, A.Ya. & Demidov, A.R. (1962). Machines for cleaning grain with air flow. Moskow: Mashgiz [in Russian].
6. Nelyubov, A.I. & Winds, E.F. (1967). Pneumatic separating systems of agricultural machines. Moskow: Mechanical Engineering [in Russian].
7. Prandl, L. (1951). Hydroaeromechanics. Moskow: Foreign. lit. [in Russian].
8. Zuev, F.G. (1976). Pneumatic transportation at grain processing plants. Moskow: Kolos [in Russian].
9. Matveev, A.S. (1973). Investigation of the process of separation of grain mixtures by vertical ascending air flow. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moskow: VIM. [in Russian].
10. Zlochevsky, V.L. (1986). Intensification of the process of aerodynamic separation of grain materials. Doctor's thesis.. Novosibirsk. Sib. IMESH [in Russian].
11. Abduev, M.M. & Manchinsky, Yu.O. (2000). Theoretical value of the pre-social area of the parameters of the daily attendant. *Science of the National Agrarian University, Vol. 7*, 127 - 132. [in Ukrainian].
12. Kolodiy, O.S. (2015). Obruntuvannya of constructive - technological parameters of pneumogravitational separator for sleepers. *Extended abstract of candidate's thesis*. Melitopol, TDTAU [in Ukrainian].
13. Stepanenko S.P. & Kotov B.I. (2018). Pre-admission of regularities to the decline of components in grain material before an hour of pneumogravitational fractionation near the vertical channel. *Mechanization and electrification of the Silskoy state gift: Zagalnoho zbirnik, Vol. 7 (106)*, 82-89. [in Ukrainian].
14. Onishchenko, B.V. (2009). Theoretical dosage to the process of growing the space. *Silskogospodarski machines Lutsk, Vol. 18*, 330 - 340 [in Ukrainian].
15. Loytsyansky, L.G. (1950). *Mechanics of liquid and gas*, M.-L. : State. ed. Tekhniko-teor lit. [in Russian].
16. Babukha, G.L. & Shreiber, A.A. (1972). *Interaction of particles of polydisperse material in two-phase flows*. Kyiv: "Naukova Dumka" [in Russian].
17. Bakum, M.V., Olshansky, V.P. & Krekot, M.M.. (2009). Theoretical analysis of a debris of particles in a flat, heaped pneumatic channel of separators. *Bulletin of KhNTUSG, Vol. 88*, 19 - 26. [in Ukrainian].
18. 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". Bulgarian, Vol. 63. Issue 2. Pp. 54–56. [in English].
19. Kotov, B. I., Kalinichenko, R.A., Stepanenko, S.P., Shvidya, V.O. & Lisetsky, V.O. (2017). 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].
20. Stepanenko S. Experimental study in a pneumatic microbiocature 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, vol. 12 (61), No. 1 – 2019. pp. 117-128. [in English].
21. 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 - Agricultural Engineering . Jan-Mar 2019, Vol. 57 Issue 1, p141-146. 6p. [in English].
22. Research into 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> [in English].
23. The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality [Text] / O. Vasytkovskyi, K. Vasytkovska, S. Moroz, M. Sviren, L. Storozhyk // INMATEH - Agricultural Engineering – Romania, Bucharest: INMA. Vol. 57, No.1. 2019, 63-70. [in English].
24. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding [Text] / O.V. Nesterenko, S.M. Leshchenko, O.M. Vasytkovskyi, D.I. Petrenko // INMATEH - Agricultural Engineering – Romania, Bucharest: INMA. Vol. 53, No.3. 2017, 65-70. [in English].

Serhii Stepanenko PhD tech. sci., Senior Researcher

National Scientific Center "Institute of Agricultural Mechanization and Electrification", Glevakha, Ukraine

Boris Kotov, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Podilsky State Agrarian Technical University, Kamyanets-Podilsky, Ukraine

Main the Oretical Provisions of Grain Material Separation in Air Channels with Unequal Air Flow Speed

The article considers the increase of efficiency of grain materials separation in pneumatic vertical channels by determining the rational shape and parameters of material supply, as well as the geometric shape of the pneumatic channel and options for separation into fractions.

Regularities of change of trajectory and speed of movement of material in pneumatic vertical channels of round section with the lower unloading of material are received. The regularities of particle motion in the form of a material point were determined taking into account air resistance forces, friction forces, Magnus and Zhukovsky forces, material moisture and density based on a theoretical study of grain fractionation in pneumatic vertical channels.

Using the proposed dependences for the design of air separators, it is possible to determine the initial rate of introduction and the direction of entry of grains into the air stream, which are the initial conditions for determining the trajectory of material in air channels with lower material discharge.

air flow, grain material, Magnus and Zhukovsky forces, variable air velocity, trajectory, fractionation process, air separator

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 629.113.5.62-592

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.133-139>

В.О. Дубовик, доц., канд. техн. наук, **Ю.А. Невдаха**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук, **В.М. Чернов**, магістрант

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: zenesperanto@gmail.com*

Підвищення довговічності роликів-електродів при електроконтактному наплавленні деталей мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки

Витрати на ремонт деталей мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки постійно зростають, тому актуальним є питання пошуку недорогих технологій їх відновлення. До таких технологій відноситься електроконтактне наплавлення. Однією з причин, що стримує широке застосування цього способу, є низька зносостійкість ролика-електрода.

У дослідженні розглядали умови роботи роликів-електродів, міцність зварного з'єднання при застосуванні інструменту із різним ступенем спрацювання. Встановлено, що спрацювання ролика-електрода при електроконтактному наплавленні негативно позначається на міцності зварного з'єднання металопокриття з основою через зменшення деформації присадного дроту. Повністю компенсувати негативний вплив спрацювання електроду на якість зварного з'єднання коригуванням технологічних режимів наплавлення не вдається.

В результаті розробили рекомендації по вибору матеріалу і розмірів роликів-електродів, що застосовуються при електроконтактному наплавленні деталей мобільної сільськогосподарської та транспортної техніки.

електроконтактне наплавлення, ролик-електрод, присадний дріт, зносостійкість, металопокриття

© В.О. Дубовик, Ю.А. Невдаха, В.В. Пукалов, В.М. Чернов, 2020