

Моделювання процесу фракціонування зерна в пневматичних каналах при накладеному електричному полі

Modeling of the grain fragment process in pneumatic channels with electrical field

Б. І. Котов, д-р техн. наук, **Ю. І. Паницир**, канд. техн. наук, **І. Д. Герасимчук**, канд. техн. наук

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

В. О. Грищенко, канд. техн. наук, Національний університет

біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

С. П. Степаненко, <https://orcid.org/0000-0002-8331-4632>

канд. техн. наук, Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», смт. Глеваха, Україна

Мета. Вдосконалення та дослідження математичної моделі руху компонентів зернового матеріалу при фракціонуванні у вертикальному повітряному каналі при нерівномірному розподілі швидкості повітряного потоку у поперечному перерізі та наявності рівномірного електростатичного поля.

Методи дослідження. Використано типові диференціальні рівняння руху матеріальної точки, що має масу і розмір частинки в рухомому середовищі з квадратичним опором до яких додано рівняння епюри швидкості повітря в поперечному перетині вертикального каналу та додаткові співвідношення, що визначають дію сил накладеного електростатичного поля. Отримана замкнена система рівнянь розв'язувалась на ПК в середовищі MathCAD.

Результати дослідження. Теоретично досліджено траєкторії переміщення частинок компонентів зернового матеріалу, кулеподібної та еліпсоїдної форми. Встановлено, що нерівномірність швидкості повітряного потоку за координатою перпендикулярно напрямку потоку знижує ефективність поділу частинок на фракції за величиною швидкості витання. Величина відхилення траєкторій на виході каналу зменшується. Для підвищення ефективності поділу запропоновано використати додаткову силову дію на компоненти, яка реалізована шляхом накладання на базатоккомпонентний потік у повітряному каналі рівномірного електростатичного поля із попереднім зарядженням частинок однойменними електричними зарядами. В результаті виявлено, що траєкторії руху часток розщеплюються більш інтенсивно і на більшу відстань, що підвищує ефективність поділу. Крім того під дією електричного поля частинки еліпсоїдної форми орієнтуються більшою віссю вздовж силових ліній електричного поля, тобто перпендикулярно потоку і відповідно зменшується величина швидкості витання, що дозволяє зменшити швидкість повітря в каналі.

Висновки. Вдосконалена математична модель руху частинок компонентів зернового матеріалу дозволяє визначити вплив параметрів потоку, в тому числі і ступеня нерівномірності розподілу швидкості на величину розходження траєкторій, яке обрано критерієм ефективності поділу. Застосування накладеного на повітряний потік із зваженими в ньому частинками матеріалу збільшує величину розходження траєкторій і швидкість витання частинок за рахунок стабільної орієнтації частинок еліпсоїдної форми.

Вступ

У світовій та вітчизняній практиці вдосконалення існуючих і створення нових машин та обладнання після збиральної обробки зерна або насіння визначилась тенденція використання ресурсо- і енергозберігаючих технологій. Найбільш повно вимоги економного використання матеріалів і енергоресурсів задовольняють зерносепаруючі машини, працюючі за технологією фракціонування зернового матеріалу (поділу на фуражну, продовольчу і насінневу фракції) з використанням повітряного потоку. В якості основних ознак фракціонування найчастіше пропонується поділ за аеродинамічними властивостями в пневмосепаруючих каналах [1—13].

На основі аналізу вітчизняних і закордонних конструкцій повітряних зерносепаруючих машин виявлено загальні тенденції їх розвитку [10, 11], використання вертикальних аспіраційних каналів як в складі універсальних машин [3], так і самостійних сепараторів [5—7], багаторівневе введення матеріалу в канал [8], поділ на фракції з нижнім вивантаженням [1, 6], застосування змінної в напрямку руху повітря швидкості [9].

Більшість авторів розглядають рух однорідної уособленої частинки зернового матеріалу в рухомому повітряному потоці, у рівномірно-розподіленому за перерізом каналу повітряному потоці, при цьому поділ здійснюється тільки на дві фракції: «легку» (верхнє вивантаження з каналу) і «важку» — з нижнім сходом. В роботах [6, 9] вперше запропоновано реалізувати поділ зерна на фракції з нижнім вивантаженням, шляхом розгалуження траєкторій руху окремих компонентів. Але усі проведені аналітичні дослідження [9, 12, 13] і розроблені моделі не враховують нерівномірності повітряного потоку в поперечному перерізі каналів, та орієнтацію частинок не правильної форми. Відомі пропозиції і дослідження спрямовані на підвищення ефективності поділу при використанні електричного поля накладеного на багатофракційну зернову суміш в повітряному потоці [14, 15]. Але ці роботи спрямовані на підвищення ефективності двофракційних сепараторів з нижнім вивантаженням і верхнім видаленням легкої фракції.

Відсутність даних досліджень щодо впливу нерівномірності епюри повітряного потоку на розгалуження траєкторій руху компонентів зернового матеріалу, та електричного поля, як фактора, що інтенсифікує процес поділу і дозволяє використовувати його параметри як керуючі дії, визначають актуальність теми досліджень.

Основна частина

Процес розділення компонентів зернового матеріалу в повітряному потоці, як відомо, базується на різниці аеродинамічних властивостей окремих компонентів. При подачі зернового матеріалу, що складається з частинок, які відрізняються аеродинамічними властивостями (швидкість витання), у вертикальний висхідний повітряний потік певної швидкості частина зернин виноситься потоком у верхню частину каналу, а інша частина рухається донизу проти потоку, тобто вихідний матеріал розділяється на дві фракції. Але частина компонентів у низхідному потоці зерна, частки якого теж різняться аеродинамічними властивостями, рухатиметься донизу за різними траєкторіями, тобто низхідний потік розділяється і траєкторії розщеплюються. За величиною відхилення траєкторій здійснюється поділ на фракції. Надалі розглядається тільки низхідний рух компонентів зернового матеріалу у висхідному повітряному потоці (рисунок 1).

Основною аеродинамічною характеристикою компонентів зернового матеріалу, є швидкість витання, величина якої у рівняннях руху враховується коефіцієнтом вітрильності

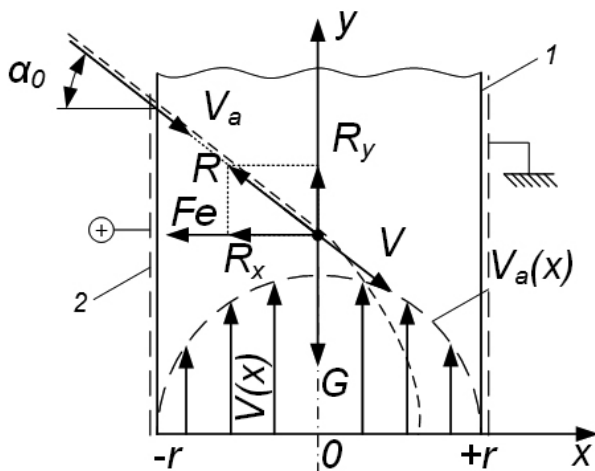


Рисунок 1— Схема сил, що діють на частку в повітряному каналі (1 — канал, 2 — електроди)

$$k_v = \frac{C(Re)S_m\rho}{2m} = \frac{g}{V_v^2},$$

де $C(Re)$ — коефіцієнт аеродинамічного опору як функція числа Рейнольдса, S_m — площа міделєвого перерізу, m^2 , ρ — густина повітря, $кг/м^3$, m — маса частинки, $кг$, g — прискорення вільного падіння, $м/с^2$, V_v — швидкість витання, $м/с$.

Аеродинамічна сила опору повітряному потоку пропорційна квадрату відносної швидкості U

$$R = \frac{C(Re)S_m\rho U^2}{2}.$$

При дослідженні процесу пневмофракціонування використано загальноприйняті припущення, які спрощують порівняльний аналіз: обертання частки під дією несиметричного обтікання не враховується, орієнтація частки незмінна, величина k_v і S_m

прийняті незмінними, швидкість витання частинок визначена експериментально, аеродинамічний режим у камері усталений.

В якості імітаційної моделі переміщення матеріальної частинки у рухомому середовищі з опором використано загальноприйняті типові диференційні рівняння [13]

$$\frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} = g - k_v \left(V(x) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right) \sqrt{\left(V(x) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right)^2}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 x(\tau)}{d\tau^2} = -k_v \frac{dx(\tau)}{d\tau} \sqrt{\left(V(x) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right)^2}, \quad (2)$$

з початковими умовами: $\tau = 0, x = -r, y = h\tau = 0, x = r, y = h, V_{0x} = dx(\tau)/d\tau = V_b \cos \alpha_0, V_{0y} = V(x) + dy(\tau)/d\tau = V_b \sin \alpha_0$

$$V_b = \sqrt{V_{0x}^2 + (V(x) + V_{0y})^2} \quad (3)$$

Профіль поля швидкостей повітряного потоку (розподіл швидкості) за шириною каналу $V(x)$ описано рівнянням

$$V(x) = V_m + \frac{V_d}{a} \left(\ln \left(1 - \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) \quad (4)$$

У рівняннях (1—4) позначено: — швидкість потоку повітря на відстані x від стінок каналу, m/c , V_0 — швидкість частинки при вході у потік повітря, m/c , α_0 — кут швидкості частинки при вході у потік повітря, *град*, x, y — координати руху частинки, m , τ — поточний час, s , V_d — динамічна швидкість, m/c , a — експериментальний коефіцієнт (залежить від властивостей повітря і умов його руху в каналі), V_m — максимальна швидкість повітря в каналі, m/c , r — відстань від стінок до осі каналу, m , h — висота каналу (від місця вводу матеріалу), m .

Підставляючи значення $V(x)$ з (4) в (1) і (2) після відповідних перетворень отримаємо:

$$\frac{d^2x(\tau)}{d\tau^2} = -k_v \frac{dx(\tau)}{d\tau} \sqrt{\left(V_m + \frac{V_d}{a} \left(\ln \left(1 - \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right)^2} \quad (5)$$

$$\frac{d^2y(\tau)}{d\tau^2} = -k_v \frac{dy(\tau)}{d\tau} \sqrt{\left(V_m + \frac{V_d}{a} \left(\ln \left(1 - \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right)^2} \quad (6)$$

Таким чином, при певних співвідношеннях визначальних факторів (швидкість повітряного потоку, кут і початкова швидкість введення матеріалу, щільність зернового потоку при зустрічі з повітрям) вертикальний канал можна і доцільно використовувати для фракціонування зернових і насінневих матеріалів [13] за технологічними властивостями (маса зерен, їх густина), які корелюють з аеродинамічними властивостями.

На рисунку 2 побудовано траєкторії руху частинок зернового матеріалу у вертикальному повітряному потоці.

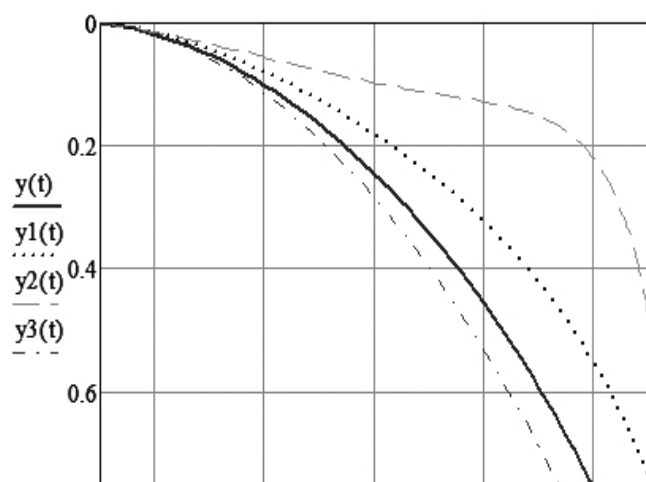


Рисунок – 2 Траєкторії руху частинок зернового матеріалу у вертикальному повітряному потоці:

$\alpha_0 = 450$; $y(t) - VB = 6 \text{ м/с}$; $y_1(t) - VB = 8 \text{ м/с}$;
 $y_2(t) - VB = 11 \text{ м/с}$; $y_3(t) - VB = 5 \text{ м/с}$

Найбільший вплив на ефективність фракціонування (розщеплення траєкторій) впливають наступні фактори:

- швидкість повітряного потоку і її розподіл за шириною каналу;
- початкова швидкість, кут і умови (щільність зернового потоку при зустрічі із зерновим потоком) введення сепаруючої суміші в пневмоканал;
- фізико-механічні властивості компонентів зернової суміші.

Покращити якість поділу компонентів зернового матеріалу у висхідному повітряному потоці можна, забезпечуючи додаткову силову дію на частинки, значення якої буде різною для різних за розміром і густиною компонентів. Реалізувати таку силову дію на компоненти зернового матеріалу можна шляхом використання такого електротехнологічного прийому: надання частинкам певного електричного заряду перед або протягом подачі матеріалу до повітряного потоку і створення у сепаруючому каналі однорідного електричного поля.

Розглянемо переміщення частинки матеріалу в вертикальному повітряному каналі при сукупній дії

висхідного повітряного потоку, додаткової електричної сили, гравітаційної сили та сили опору повітряному потоці. Схему взаємодії сил показано на рисунку 1. Прийmemo, що частка має форму, близьку до кулі. Для виявлення умов, за яких відбувається розділення частинок компонентів, визначимо умови зарядження частинок електричним зарядом і величину самої електричної сили, що діє на частинку, яка рухається у повітряному потоці протитечієво.

На ділянці живильного пристрою в електричному полі частинки матеріалу заряджаються (отримують електричний заряд), використовуючи методи: електростатичної індукції (контактне зарядження), осадження іонів у полі коронного розряду (безконтактна зарядка) і комбінації названих способів. При контактному способі зарядження частинок, величина електричного заряду залежить від контактної опору частинки з електродом, який значною мірою залежить від вологості (сухі частинки, які не проводять електричний струм в електричному полі не заряджуються). Тому такий спосіб доцільно використовувати для поділу фракцій за вологовмістом. Іонну зарядку найбільш вивчено і вона більш ефективна, відбувається осадження іонів із об'єму повітря на поверхню частинки в електричному полі коронного розряду.

Величина максимального заряду частинок сферичної форми в електричному полі визначається за відомою формулою Рімана

$$Q_e = Er^2 \varepsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \right), \quad (7)$$

де E — напруженість електричного поля, В/м, ε — відносна діелектрична проникність частинки, τ — радіус частинки, м, ε_0 — діелектрична проникність вакууму, Ф/м.

Враховуючи, що відносна діелектрична проникність зерна залежить від густини, за даними літературних джерел, цю залежність можна апроксимувати виразом

$$\varepsilon_i(\rho) = a + b\rho_i + c\rho_i^2, \quad (8)$$

де a , b , c — сталі коефіцієнти, що залежать від виду культури, то величину електричного заряду можна використовувати як суттєвий чинник поділу в повітряному потоці, ρ_i — густина частинки компоненту i -тої фракції.

Електрична сила, яка діє на частинку в електричному полі пропорційна її заряду Q і напруженості поля E

$$F_e = QE,$$

або враховуючи (7), (8)

$$F_e = E^2 r^2 \varepsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon_i(\rho_i) - 1}{\varepsilon_i(\rho_i) + 1} \right). \quad (9)$$

З урахуванням додатково діючої електричної сили відповідно до рисунку 3 рівняння (6) запишемо у вигляді

$$\frac{d^2 x(\tau)}{d\tau^2} = -F_e - k_v \frac{dx(\tau)}{d\tau} \times \sqrt{\left(V_m + \frac{V_d}{a} \left(\ln \left(1 - \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right)^2}. \quad (10)$$

Рівняння (9) включає розмірну характеристику зернової частки $r = d_e/2$, де d_e — еквівалентний ліаметр частинки, що визначається за площею проекції частинки, яка дорівнює міделевому перерізу $d_e = \sqrt{4S_i/\pi}$, визначити яку для частинок неправильної форми ускладнено.

Основною аеродинамічною характеристикою компонентів зернової суміші є швидкість витання, яка для поодиноких сферичних поверхонь визначається очевидним співвідношенням, що відповідає рівності сил $R = mg$, відношенням

$$V_{\text{внт}} = \sqrt{\frac{4d_e \rho_r g}{3\rho_v \xi}} \quad (11)$$

Використовуючи значення коефіцієнта опору із залежності ξ (Re) при $Re > 700$ $\xi = 0,44$ із співвідношення (10) маємо

$$V_{\text{внт}} = \sqrt{\frac{4d_e \rho_r g}{3\rho_v 0,4}} \quad (12)$$

звідки

$$d_e = 0,33 \frac{\rho_v}{\rho_r g} V_{\text{внт}}^2 \quad (13)$$

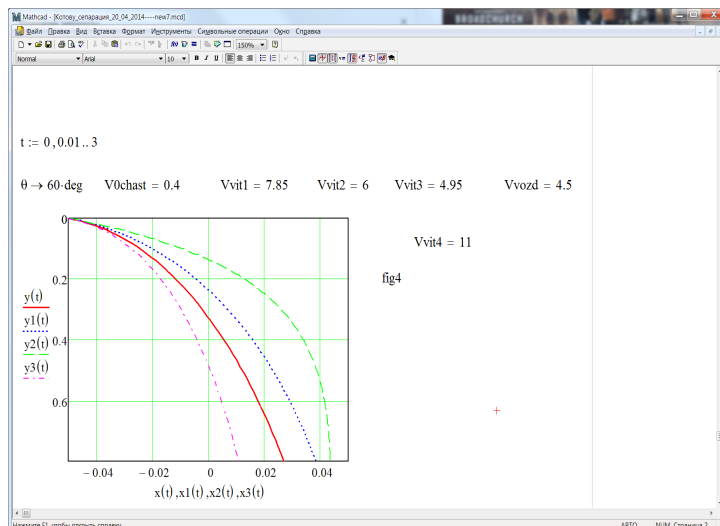


Рисунок 3 — Траєкторії руху кулькоподібної частинки у вертикальному потоці за наявності накладеного електростатичного поля

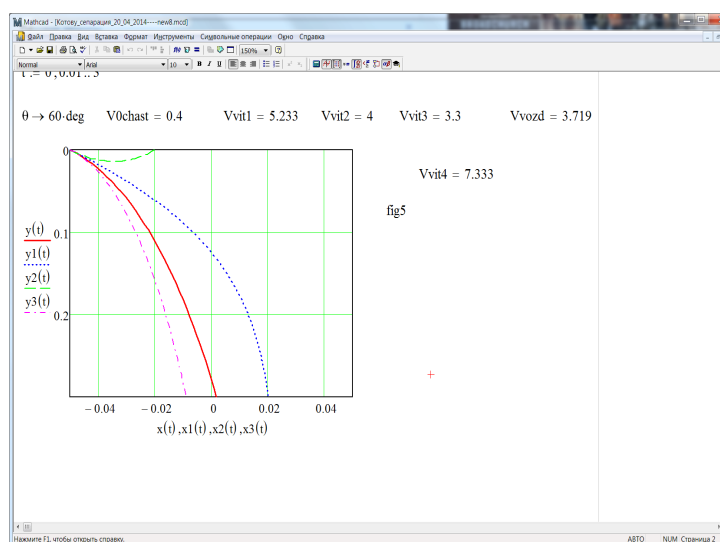


Рисунок 4 — Траєкторії руху частинок у формі еліпсоїда обертання у вертикальному каналі з накладеним електростатичним полем

Підставляючи значення еквівалентного діаметра (радіуса) в рівняння (9) матимемо

$$F_{\epsilon} = E^2 \epsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\epsilon_i(\rho_i) - 1}{\epsilon_i(\rho_i) + 1} \right) \left(\frac{0.33}{2} \frac{\rho_v}{\rho_r g} V_{\text{шм}}^2 \right)^2. \quad (14)$$

Таким чином, величину еквівалентної сили, що діє на частинку в електричному полі можна визначити, виходячи з величини швидкості витання, яка, як правило, визначається експериментально.

Як впливає з аналізу виразу (14), на електричну силу, що діє на частку в напрямку вектору електричного поля (перпендикулярно вектору потоку повітря), значною мірою впливає напруженість електричного поля і властивості самої частки, які визначаються швидкістю витання.

За результатами розв'язку системи рівнянь (5), (10) за означених вище початкових умов на рисунку 3 побудовано траєкторії руху кулькоподібної частинки у вертикальному потоці за наявності накладеного електростатичного поля

Аналіз отриманих результатів свідчить, що розгалуження траєкторій і величина кінцевого (на виході каналу) відхилення за наявності додаткового електростатичного впливу збільшується.

У наведених вище результатах дослідження геометрія частинки визначалась формою у вигляді кулі. Але у більшості колосових культур зернини мають форму, що суттєво відрізняється від кулі, тому форма зернин апроксимується [14, 15] еліпсоїдом обертання.

Математичний опис (модель) перехідного процесу орієнтації частинки, в електричному полі може бути в спрощеному вигляді подана рівнянням

$$I \frac{d^2 \gamma}{d\tau^2} = M_v + M_e, \quad (15)$$

де $M_v = (k_2 - k_1) V_r \frac{\rho V^2}{2} \sin 2\gamma$ — обертальний момент, діючий збоку повітряного потоку на еліпсоїд обертання,

$M_e = \frac{E^2 \varepsilon_0}{2} V_r k_\phi \sin 2\gamma$ — обертальний момент електричного поля, — момент інерції

зернини, γ — кут між напрямком руху і більшою віссю еліпсоїда обертання, k_1, k_2 — поперечний і поздовжній коефіцієнти інерції тіла обертання, що рухається у повітрі, k_ϕ — діелектричний коефіцієнт форми, V_r — об'єм частинки.

Обертальний момент, спрямований таким чином, щоб орієнтувати еліпсоїд обертання більшою віссю під прямим кутом до вектора швидкості повітря. При цьому величина швидкості витання (як основна ознака поділу поодиноких насінин) зменшуватиметься

$$V_\varepsilon = \sqrt{\frac{2mg}{\rho_v \xi S_m}} = \sqrt{\frac{4g}{3\rho_v \xi c - (a-c)\sin^2 \gamma} \frac{ab\rho_r}{c}}, \quad (16)$$

де a, b — довжина і товщина зернини (довша і коротша осі).

Час орієнтації еліпсоїда обертання

$$V_\varepsilon = \sqrt{\frac{2mg}{\rho_v \xi S_m}} = \sqrt{\frac{4g}{3\rho_v \xi c - (a-c)\sin^2 \gamma} \frac{ab\rho_r}{c}} \quad (17)$$

За рахунками і експериментами [14, 15] час орієнтації зернини вздовж силових ліній поля складає 0,05 с за цей період частинка з $v_b = 9$ м/с переміщується: $x = 11,2$ мм, $y = 17,6$ мм.

На рисунку 4 показано розрахункові траєкторії руху частинок компонентів з урахуванням зменшення швидкості витання за виразом (16) в припущенні «миттєвої переорієнтації».

Проаналізувавши розрахункові графічні залежності, що визначають траєкторії руху окремих компонентів зернового матеріалу можна констатувати наступне. Нерівномірність повітряного потоку в поперечному перетині вертикального каналу знижує ефективність поділу зерна на фракції. Дія електричного поля на частинки, що отримали електричний заряд викликає прирощення горизонтальної складової швидкості частинки. Переорієнтація частинки у формі еліпсоїда обертання і стабілізація її положення в електричному полі пневмоканалу дозволяє зменшити швидкість повітря в каналі і питомі витрати на процес поділу. Крім того зменшується висота робочої зони каналу.

Висновки

Вдосконалена математична модель руху частинок компонентів зернового матеріалу дозволяє визначити вплив параметрів потоку, в тому числі і ступеню нерівномірності розподілу швидкості в поперечному перерізі каналу, на величину розходження траєкторій, яка обрана критерієм ефективності поділу. Виявлено зменшення розходження траєкторій при змінній епюрі швидкості повітря. Застосування накладеного на низхідний потік дисперсного матеріалу дозволяє збільшити величину розходження траєкторій та швидкості витання частинок у формі еліпсоїда обертання і, відповідно, підвищити ефективність поділу матеріалу на фракції.

Література

1. Котов, Б. І. Концептуальні основи створення технічних засобів первинної обробки зерна в умовах господарств АПК / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, Р. А. Калініченко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. — 2017. — Вип. 47. — Ч. 1. — С.105—114.

2. Оробинский, В. И. Теоретические предпосылки получения полноценного зерна фракционной технологией послеуборочной обработки / В. И. Оробинский, А. М. Гиевский // Механизация и электрификация. — 2008. — №5. — С.8—10.
3. Гиевский, А. М. Повышение эффективности работы универсальных воздушно-решетных зерноочистительных машин: автореф. дис.... докт. техн. наук: 05.20.01. / Гиевский Алексей Михайлович, Воронеж, 2016. — 40 с.
4. Злочевский, В. П. Повышение технологической эффективности пневмофракционирования зерновых масс / В. П. Злочевский, О. Н. Терехова // Хранение и переработка зерна. — 2004. — №5. — С.38—40.
5. Stepanenko, S. P. Research pneumatic gravity separation grain materials (Исследование воздушногравитационной сепарации зерновых материалов) / S. P. Stepanenko // International scientific journal. Mechanization in agriculture, conserving of the resources. Scientific technical union of mechanical engineering industry-4.0 Bulgarian association of mechanization in agriculture. 2017. — Issue 2. — S.54—56.
6. Колодій, О. С. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневмогравітаційного сепаратора насіння соняшника: автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.05.11 / О. С. Колодій. — Мелітополь, 2015. — 23 с.
7. Ермак, В. П. Концепція аеродинамічної сепарації насіння сільськогосподарських культур та засоби її реалізації: автореф. дис.... докт. техн. наук : 05.05.11 / В. П. Ермак. — Тернопіль, ТДАУ, 2009. — 39 с.
8. Нестеренко, О. В. Обґрунтування параметрів пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зернового матеріалу: автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.05.11. / О. В. Нестеренко. — Кропивницький, — 2017. — 21 с.
9. Котов, Б. І. До питання пневмогравітаційної сепарації зернових матеріалів / Б. І. Котов, А. В. Спірін, І. В. Твердохліб // Техніка, енергетика, транспорт АПК. — 2017. — Вип. 4. — С.51—55.
10. Кошулько, В. С. Тенденции развития технологии и технических средств для сепарации зерновых материалов / В. С. Кошулько // Хранение и переработка зерна. — 2014. — №2. — С.22—24.
11. Степаненко, С. П. Аналіз розвитку конструкцій пневмосепаруючих систем сепараторів / С. П. Степаненко, В. О. Швидя, І. С. Попадюк // Механізація та електрифікація с-г. — 2017. — Вип. 5. — С.132—142.
12. Колодій, О. С. Математическое описание поведения зерновок подсолнечника в воздушном потоке разделительных установок / О. С. Колодій, С. В. Кюрчев // Motrol, Lublin. — 2015. — Vol. 17. — №9. — P.9—17.
13. Котов, Б. І. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження) / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко, С. П. Степаненко, В. О. Швидя, В. О. Лісецький / Монографія. — Ніжин, 2017. — 552 с.
14. Дадак, В. О. Підвищення ефективності пневмосепарування насіння кормових трав / В. О. Дадак // Вісник Харківського національного технічного ун-ту сільського господарства. — 2014. — № 144. — С.225—232.
15. Ковалишин, С. Теоретичне дослідження розділення дрібнонасінневих сумішей у пневмоелектричному каналі / С. Ковалишин, І. Ніщенко, Ю. Ковальчук, В. Дадак // Вісник Львівського національного аграрного університету. — 2014. — № 18. — С. 86—95.

References

1. Kotov, B. I. Kontseptualni osnovy stvorennia tekhnichnykh zasobiv pervynnoi obrobky zerna v umovakh hospodarstv APK / B. I. Kotov, S. P. Stepanenko, R. A. Kalinichenko // Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. Zagalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnichniy zbirnyk. 2017. — Vyp. 47. — Ch. 1. — S. 105—114.
2. Orobinskiy, V. I. Teoreticheskie predposylki polucheniya polnotsennogo zerna fraktsionnoi tekhnologiyey posleuborochnoy obrabotki / V. I. Orobinskiy, A. M. Gievskiy // Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya. — 2008. — №5. — S.8—10.
3. Gievskiy, A. M. Povyshenie effektivnosti raboty universalnykh vozduшно-reshetnykh zernoochistitelnykh mashin: avtoref. dis.... dokt. tekhn. nauk: 05.20.01. / Gievskiy Aleksey Mikhaylovich, Voronezh, 2016. — 40 s.
4. Zlochevskiy, V. P. Povyshenie tekhnologicheskoy effektivnosti pnevmofraktsionirovaniya zernovykh mass / V. P. Zlochevskiy, O. N. Terekhova // Khranenie i pererabotka zerna. — 2004. — №5. — S. 38—40.
5. Stepanenko, S. P. Research pneumatic gravity separation grain materials / S. P. Stepanenko // International scientific journal. Mechanization in agriculture, conserving of the resources. Scientific technical union of mechanical engineering industry-4.0 Bulgarian association of mechanization in agriculture. 2017. — Issue 2. — S.54—56.
6. Kolodii, O. S. Obgruntuvannia konstruktivno-tekhnologichnykh parametriv pnevmohravitatsiinoho separatora nasinnia soniashnyka: avtoref. dys.... kand. tekhn. nauk : 05.05.11 / O. S. Kolodii. — Melitopol, 2015. — 23 s.
7. Ermak, V. P. Kontseptsii aerodynamichnoi separatsii nasinnia silskohospodarskykh kultur ta zasoby yii realizatsii: avtoref. dys.... dokt. tekhn. nauk : 05.05.11 / V. P. Ermak. — Ternopil, TDAU, 2009. — 39 s.

8. Nesterenko, O. V. Obgruntuvannya parametriv pnevmoseparuiuchogo kanalu z bahatorivnevym vvedenniam zernovogo materialu: avtoref. dys.... kand. tekhn. nauk : 05.05.11. / O. V. Nesterenko. — Kropyvnytskyi, — 2017. — 21 s.
9. Kotov, B. I. Do pytannia pnevmogravitatsiinoi separatsii zernovykh materialiv / B. I. Kotov, A. V. Spirin, I. V. Tverdokhlib // Tekhnika, enerhetyka, transport APK. — 2017. — Vyp. 4. — S.51—55.
10. Koshulko, V. S. Tendentsii razvitiya tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv dlya separatsii zernovykh materialov / V. S. Koshulko // Khranenie i pererabotka zerna. — 2014. — №2. — S.22—24.
11. Stepanenko, S. P. Analiz rozvytku konstruksii pnevmoseparuyuchykh system separatoriv / S. P. Stepanenko, V. O. Shvydia, I. S. Popadiuk // Mekhanizatsiya ta elektryfikatsiya s-h. — 2017. — Vyp. 5. — S.132—142.
12. Kolodiy, O. S. Matematicheskoe opisanie povedeniya zyrnovok podsolnechnika v vozdushnom potoke razdelitel'nykh ustanovok / O. S. Kolodiy, S. V. Kyurchev // Motrol, Lublin. — 2015. — Vol. 17. — №9. — S.9—17.
13. Kotov, B. I. Modeliuvannya tekhnologichnykh protsesiv v typovykh ob'ekтах pisliazbyralnoi obrobky i zberigannya zerna (separatsiia, sushinnia, aktyvne ventyliuvannya, okholodzhennia) / B. I. Kotov, R. A. Kalinichenko, S. P. Stepanenko, V. O. Shvydia, V. O. Lisetskyi / Monohrafiia — Nizhyn, 2017. — 552 s.
14. Dadak, V. O. Pidvyshchennia efektyvnosti pnevmoseparuvannya nasinnia kormovykh trav / V. O. Dadak // Visnyk Kharkivskogo natsionalnogo tekhnichnogo universytetu silskogo gospodarstva. — 2014. — № 144. — S.225—232.
15. Kovalyshyn, S. Teoretychne doslidzhennia rozdilennia dribnonasinnievykh sumishei u pnevmoelektrychnomu kanali / S. Kovalyshyn, I. Nishchenko, Yu. Kovalchuk, V. Dadak // Visnyk Lvivskogo natsionalnogo agrarnogo universytetu. — 2014. — №18. — S.86—95.

Надійшла 20.06.2018 року

УДК 631.362.36

UDC 631.362.36

Моделирование процесса фракционирования зерна в пневматических каналах при наложенном электростатическом поле

**Б. И. Котов, Ю. И. Панцир, И. Д. Герасимчук,
В. А. Грищенко, С. П. Степаненко**

Цель. Усовершенствование и исследование математической модели движения компонентов зернового материала при фракционировании в вертикальном воздушном канале с неравномерным распределением скорости воздушного потока в поперечном сечении канала при наличии равномерного электростатического поля.

Методы исследования. Используются типовые дифференциальные уравнения движения материальной точки в сопротивляющейся среде с квадратичным законом сопротивления, к которым добавлены уравнения эпюры скорости потока в поперечном сечении вертикального канала и дополнительные соотношения, которыми определяется действие сил наложенного электростатического поля.

Результаты исследования. Теоретически исследованы траектории перемещения частиц компонентов зернового материала шарообразной и эллипсоидной формы. Установлено, что неравномерность скорости воздушного потока по поперечному сечению канала снижает эффективность разделения частиц на фракции по величине скорости витания. Величина отклонения

Modeling of the grain fragment process in pneumatic channels with electrical field

**B. I. Kotov, Yu. I. Pansir, I. D. Gerasimchuk
V. O. Gryshchenko, S. P. Stepanenko**

Aim. Improvement and investigation of the mathematical model of the grain material components motion during fractionation in a vertical air channel with a non-uniform distribution of airflow velocity in the cross section of the channel in the presence of a uniform electrostatic field.

The research methods. Typical differential equations of motion of a material point in a resisting medium with a quadratic law of resistance are added, to which equations of the velocity diagram of the flow in the cross section of the vertical channel and additional relationships that determine the action of the forces of the superimposed electrostatic field are added.

The research results. The trajectories of the particles of the grain material components of a spherical and elliptical shape are studied theoretically. It is established that the unevenness of the air flow velocity along the channel cross-section reduces the efficiency of particle separation into fractions in terms of the speed of winding. The magnitude of the deviation (splitting) of the trajectories at the outlet of the channel decreases. To increase separation efficiency, it is suggested to use additional force influence on the material components, which is realized by imposing on

(расщепления) траекторий на выходе канала уменьшается. Для повышения эффективности разделения предложено использовать дополнительное силовое воздействие на компоненты материала, которое реализовано путем наложения на многофракционный поток в канале равномерного электростатического поля и предварительной зарядки частиц одноименными электрическими зарядами. позволяет снизить скорость воздушного потока в канале и высоту канала.

Выводы. Усовершенствованная математическая модель движения частиц компонентов зернового материала позволяет определить влияние параметров потока, в том числе и степени неравномерности распределения скорости на величину расхождения траекторий, которое принято критерием эффективности. Применение наложенного электростатического поля на воздушный поток с взвешенным в нем частицами материала, увеличивает расхождение траекторий и уменьшает скорость витания частиц эллипсоидной формы за счет стабильной ориентации частиц.

Ключевые слова: зерновой материал, компоненты, фракционирование, воздушный поток, вертикальный канал, энтура скорости воздуха, электростатическое поле.

a multifraction flow in the channel of a uniform electrostatic field and preliminary charging of particles with the same electric charges. .

Conclusions. The improved mathematical model of the motion of particles of grain material components allows one to determine the effect of flow parameters, including the degree of unevenness of the velocity distribution on the magnitude of the discrepancy of trajectories, which is accepted as an efficiency criterion. The application of the superimposed electrostatic field on the air stream with the material particles suspended in it, increases the discrepancy of the trajectories and reduces the velocity of the ellipsoid shape particles whirling due to the stable orientation of the particles.

Key words: grain material, components, fractionation, air flow, vertical channel, air velocity diagram, electrostatic field.